A caccia del pianeta X

di Chadwick Trujillo

Nelle regioni esterne del sistema solare potrebbero esistere pianeti più grandi di Plutone: lo indicano recenti scoperte

LA SUPERFICIE DEL PIÙ GRANDE SATELLITE DI NETTUNO, Tritone, dà un'idea di quello che potrebbe essere l'aspetto dei grandi oggetti della fascia di Kuiper, un anello di pianetini che segnerebbe il limite del sistema solare. L'aspetto a «buccia di melone» potrebbe indicare processi geologici a grande scala, mentre le piccole macchie nere potrebbero essere «criovulcani», con azoto liquido in eruzione che erompe attraverso l'azoto solido della superficie. La strana colorazione è probabilmente causata dalla presenza di semplici composti organici. Finora sono stati individuati più di 800 oggetti nella fascia di Kuiper (KBO). Si ritiene che in questa regione vi siano oltre 30.000 oggetti con diametro di circa 100 chilometri, alcuni di circa 1000 e uno o più che potrebbero essere persino più grandi di Tritone (2700 chilometri di diametro). L'immagine è stata ottenuta dalla sonda Voyager II nel 1989.

NASA

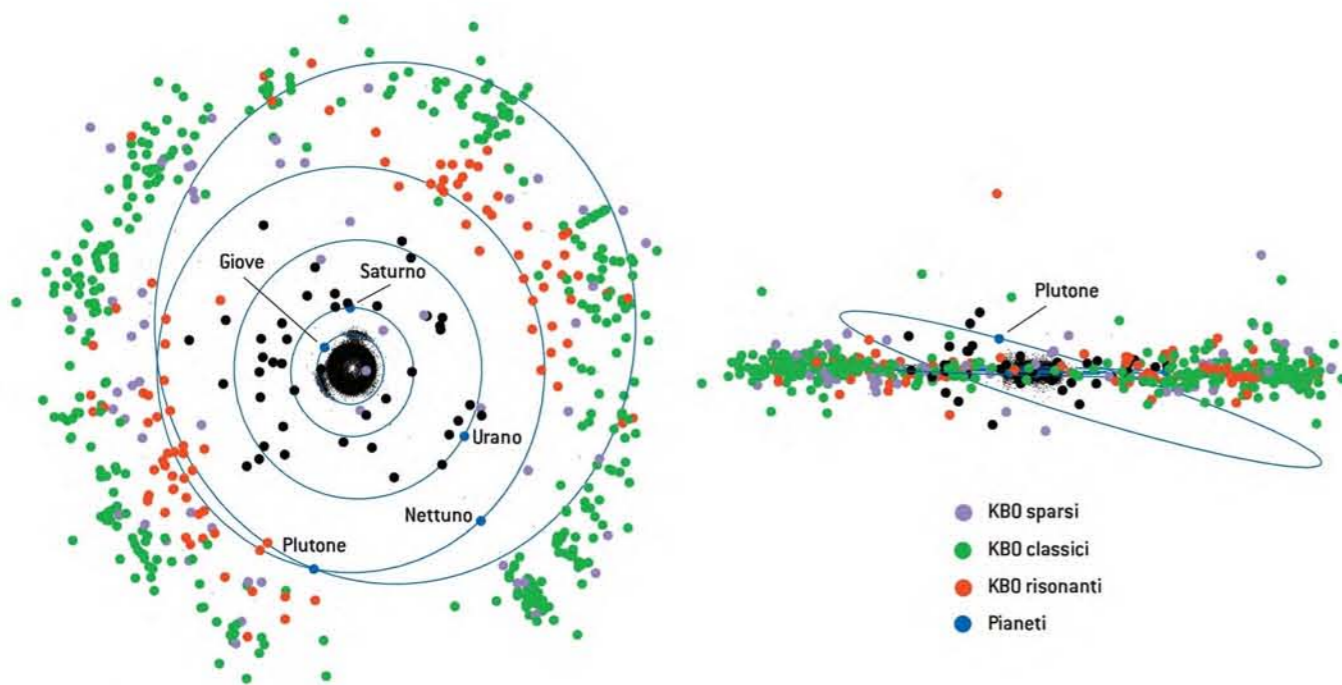
Questo articolo è stato pubblicato originariamente su «American Scientist», vol. 91, n. 5, settembre-ottobre 2003, con il titolo *Discovering the Edge of the Solar System*.

L'ultimo pianeta a essere scoperto nel sistema solare è stato Plutone, individuato da Clyde Tombaugh quasi 75 anni fa. Plutone si trova oltre i giganti gassosi più lontani, Urano e Nettuno, e la sua scoperta ha fatto pensare agli astronomi che i confini del sistema solare dovessero ancora essere trovati. Oltretutto, Plutone ha alcune strane caratteristiche in confronto ai suoi giganteschi vicini: ha una massa inferiore di circa un migliaio di volte, è costituito soprattutto da roccia e ghiaccio (anziché da gas) e ha un'orbita molto ellittica, inclinata rispetto al piano orbitale del sistema solare. Questa stranezza sembrava indicare che le zone estreme del sistema solare potessero avere caratteri del tutto diversi dalla regione dei pianeti esterni giganti. Per quanto vari scienziati abbiano ipotizzato che al di là di Nettuno vi fossero altri corpi celesti oltre a Plutone, si è dovuto attendere il 1992 perché fosse scoperto un altro oggetto trans-nettuniano, per merito di David Jewitt e Jane Luu dell'Università di Hawaii.

Il corpo trovato dai due astronomi, battezzato (15760) 1992 QB_1, sembra avere un diametro stimabile intorno a 130 chilometri. È quindi minuscolo, se confrontato con Urano e Nettuno, che hanno un diametro di circa 50.000 chilometri, e comunque più piccolo di Plutone, che ne misura quasi 2320.

Prima che si individuassero (15760) 1992 QB_1 e altri oggetti trans-nettuniani, gli astronomi ritenevano, in generale, che simili corpi dovessero avere un diametro compreso tra 1 e 10 chilometri. Ma dal 1992 sono stati scoperti oltre 800 oggetti, e la maggior parte di essi ha un diametro di circa 100 chilometri. Nell'insieme, questi corpi trans-nettuniani formano una struttura ad anello relativamente piatta attorno al Sole, chiamata «fascia di Kuiper». Il nome è un riconoscimento all'ipotesi avanzata nel 1951 dall'astronomo olandese Gerard Kuiper, secondo la quale esternamente alle orbite di Nettuno e Plutone sarebbero esistiti corpi celesti incogniti. A dire la verità, l'esistenza di una simile regione fu ipotizzata ancora prima, nel 1943, da un astronomo dilettante irlandese, Kenneth Edgeworth. E così a volte la fascia viene chiamata «di Edgeworth-Kuiper». (Nel 1930, appena sei mesi dopo la scoperta di Plutone, anche Frederick Leonard, astronomo dell'Università di Chicago, accennò alla possibilità che potessero esistere altri corpi celesti delle dimensioni di Plutone, tuttavia il nome «Leonard-Edgeworth-Kuiper» non ha goduto di molto favore.)

Edgeworth e Kuiper avevano proposto in origine l'idea di una fascia trans-nettuniana per aiutare a spiegare l'origine delle comete di breve periodo, cioè quelle con un periodo orbitale inferiore a 200 anni. In questa prospettiva, la fascia faceva da serbatoio per i corpi ghiacciati che occasionalmente transitavano attraverso il sistema solare interno. Oggi si riconosce generalmente che questa spiegazione è vera, ma l'interesse per la fascia di Kuiper è ancora più accentuato, perché i corpi che la costituiscono sono considerati i residui della nascita del sistema solare. Gli oggetti della fascia di Kuiper – brevemente detti KBO (da Kuiper Belt Object) – sono tra i più antichi corpi inalterati del sistema solare, e rappresentano così un'inesplorata fonte di conoscenza sui suoi primordi.

Fatto interessante, i KBO sembrano essere anche più grandi di quanto si ritenesse fino a non molto tempo fa. Nel giugno 2002, con il mio collega Michael Brown, del California Institute of Technology, abbiamo scoperto il più grande KBO finora conosciuto, che abbiamo chiamato Quaoar, dal nome di una divinità del popolo nativo americano Tongva, che ha ancora molti rappresentanti nell'area di

GLI OGGETTI DELLA FASCIA DI KUIPER generalmente si trovano all'esterno delle orbite di Nettuno e Plutone, i pianeti più esterni del sistema solare (*a sinistra*). Esistono tre classi di KBO: «classici» (*punti verdi*), «risonanti» (*punti rossi*) e «sparsi» (*punti viola*), che sono caratterizzati da peculiari proprietà dinamiche (*si veda il testo*). Gli altri pianeti minori del sistema solare risiedono in regioni più vicine al Sole: la fascia degli asteroidi (*puntini neri addensati*) occupa la regione tra Marte e Giove, gli asteroidi Troiani fiancheggiano Giove lungo la sua orbita, e i Centauri (*dischi neri*) hanno orbite instabili presso i pianeti gassosi giganti. Una vista di taglio della fascia di Kuiper (*a destra*) rivela che essa è molto più spessa di quanto prevedessero i modelli di formazione planetaria, i quali propongono un disco sottile paragonabile agli anelli di Saturno. Può darsi quindi che la fascia di Kuiper sia stata soggetta, fin dalla sua formazione, a perturbazioni gravitazionali che hanno aumentato la velocità degli oggetti e ingrossato il disco. Si noti anche che la peculiare orbita di Plutone (*a destra, in blu*) è inclinata, come le orbite di molti KBO risonanti.

SI RITIENE CHE LE COMETE DI BREVE PERIODO, quelle cioè con periodi orbitali inferiori a 200 anni, abbiano origine nella fascia di Kuiper. I KBO sono probabilmente scagliati verso l'interno del sistema solare da interazioni caotiche con Nettuno; spesso si frantumano e iniziano a degassarsi via via che si avvicinano al Sole. Fotografata il 4 settembre 1989, la cometa Brorsen-Metcalf è stata osservata per la prima volta nel luglio 1847 e ha un periodo di circa 71 anni.

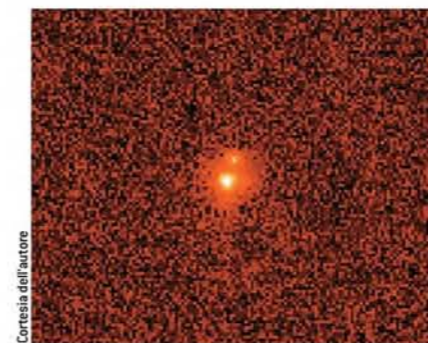
Los Angeles. Quaoar ha un diametro di circa 1300 chilometri: più o meno, la metà delle dimensioni di Plutone. L'esistenza di un KBO così grande, assieme a quella di alcuni altri oggetti con un diametro intorno ai 1000 chilometri, fa pensare che possano esservi corpi di dimensioni anche maggiori, in quella regione dello spazio. Ma vediamo che cosa si è appreso circa i KBO, e soprattutto su quelli particolarmente grandi che sono stati scoperti negli ultimissimi anni.

La fascia di Kuiper oggi

La fascia di Kuiper è conosciuta solo da pochi anni, ma la sua struttura complessiva può dirsi ormai abbastanza chiara, anche se rimane un certo numero di misteri da svelare. Gli 800 KBO noti costituiscono solo il tre per cento circa della popolazione totale attesa, stimata per estrapolazione dalla piccolissima porzione di cielo che finora è stata scandagliata. Gli astronomi valutano dunque che vi siano circa 30.000 KBO di diametro superiore a 100 chilometri. Ciò renderebbe la popolazione della fascia di Kuiper circa 10 volte più grande, per numero e massa complessiva, della fascia degli asteroidi compresa tra Marte e Giove.

Sembrano esservi tre tipi di KBO, distinguibili principalmente per le loro proprietà dinamiche. Circa il 50 per cento di essi ha orbite pressoché circolari (con eccentricità inferiore a 0,2) e occupa una struttura a forma di anello compresa tra 42 e 48 unità astronomiche (UA) di distanza dal Sole (1 UA è la distanza tra il Sole e la Terra). Sono questi i cosiddetti KBO classici, in quanto più o meno conformi all'idea originale che la fascia di Kuiper consistesse di un disco relativamente sottile ai margini del sistema solare. Un altro 10 per cento dei KBO si trova in risonanza orbitale con Nettuno (cosa che vale anche per Plutone): gran parte dei KBO risonanti compie una o due orbite attorno al Sole ogni tre orbite di Nettuno. La risonanza protegge questi piccoli KBO ghiacciati da incontri ravvicinati con il pianeta gigante, che li trascinerebbe altrimenti verso il sistema solare interno (dove essi potrebbero diventare comete), oppure li fionderebbe ancora più lontano dal Sole. Il rimanente 40 per cento degli oggetti sembra aver subito una debole interazione gravitazionale con Nettuno, che li ha dispersi in orbite molto eccentriche. Le orbite di questi KBO li possono portare ovunque, dal margine interno della fascia «classica» fino alle zone più remote del sistema solare, addirittura a 30 volte la distanza tra il Sole e Nettuno, ossia circa 900 UA!

Sebbene siano state identificate queste tre popolazioni, vi sono alcune osservazioni sulla fascia che al momento restano inspiegabili. Tra queste vi è l'esistenza del limite esterno della fascia «classica» di Kuiper: al di là di 48 UA nessun KBO presenta orbita circolare. Ci sono molte spiegazioni possibili di questo limite esterno,

LA FASCIA DI KUIPER SI È COSTITUITA OLTRE QUATTRO MILIARDI DI ANNI FA, mentre il sistema solare stava prendendo forma. I detriti delle dimensioni di ghiaia e in lento movimento ai margini del sistema solare andarono in coalescenza per attrazione gravitazionale, formando infine oggetti con un'area superficiale paragonabile a quella di uno Stato di medie dimensioni (*a*, *b*, *c*). All'inizio della sua storia la fascia di Kuiper era un disco appiattito (*d*), ma più tardi qualcosa – forse una stella in transito – sconvolse il disco, accelerò i KBO e li costrinse in orbite più fortemente inclinate. Oggi la fascia di Kuiper è relativamente spessa (*e*) e quando i KBO veloci entrano in collisione si frantumano in pezzi più piccoli (*f*).

ALCUNI OGGETTI DELLA FASCIA DI KUIPER HANNO SATELLITI. I meccanismi tradizionali per spiegare la formazione di satelliti, come le collisioni o la cattura, non funzionano bene per i KBO binari, date le piccole masse e le grandi distanze tra gli oggetti. Scoprire in che modo si siano formati questi sistemi binari dovrebbe offrire nuovi indizi circa l'ambiente primordiale della fascia di Kuiper. La coppia di oggetti nella foto – KBO 1999 TC36 e il suo satellite – è separata da circa 8300 chilometri, pari a un quindicesimo della distanza Terra-Luna.

IN SINTESI

- Plutone non è l'unico pianeta che si trovi al di là di Nettuno. In anni recenti sono stati individuati circa 800 oggetti del diametro di un centinaio di chilometri appartenenti alla fascia di Kuiper, una struttura piatta ad anello che circonda il sistema solare, e si ritiene che il loro numero totale possa arrivare a 30.000.
- Si sono anche riconosciute tre popolazioni in seno ai KBO: oltre agli oggetti «classici», ve ne sono altri in risonanza orbitale con Nettuno nonché un gruppo che segue orbite bizzarre, senza dubbio a causa di passate interazioni gravitazionali.
- Le caratteristiche altamente variabili dei KBO e la loro grande distanza ne rendono estremamente difficile l'interpretazione: alcuni astronomi includono in questa classe anche Plutone e il satellite maggiore di Nettuno, Tritone.
- È comunque in corso un programma di rilevamento che ha già portato alla scoperta di grandi KBO, fra cui Quaoar, del diametro di 1300 chilometri. Gli astronomi che lavorano su questo progetto ritengono di poter individuare anche corpi delle dimensioni di Plutone, e forse addirittura un pianeta grande quanto Marte.

LE PROCEDURE DI RICERCA SEMIAUTOMATICA e i telescopi robotici hanno consentito ai planetologi di ricercare comodamente i KBO usando il computer del proprio ufficio. I telescopi robotici, come il Palomar Oshin Telescope, sono in grado di scandire sistematicamente il cielo con uno specchio relativamente piccolo (1,2 metri di diametro) e registrare immagini con camere a CCD (*si veda l'illustrazione qui sotto*). Questo metodo ha permesso di incrementare rapidamente il numero di nuove scoperte negli ultimissimi anni.

e tutte chiamano in causa eventi catastrofici durante le prime fasi della formazione del sistema solare. In uno scenario, la materia del sistema solare esterno sarebbe stata «strappata via» dal passaggio ravvicinato di una stella. In alternativa, pianeti delle dimensioni della Terra potrebbero essere passati attraverso la fascia di Kuiper primordiale, sconvolgendone la struttura a disco. Una terza possibilità è che ulteriori risonanze con Nettuno possano avere favorito la creazione del margine esterno. Comunque sia, nessuna teoria è unanimemente accettata.

Anche lo spessore della fascia di Kuiper costituisce una sorpresa per gli osservatori. La teoria di base voleva che i KBO popolassero un disco molto sottile, esteso per meno di un grado al di sopra o al di sotto del piano del sistema solare: una condizione implicita perché i KBO si potessero formare per accrescimento a opera della gravità. Di fatto, la fascia di Kuiper ha uno spessore di circa 10 gradi, oltre a un «alone» di oggetti con inclinazioni anche molto maggiori. Questo fa pensare che la fascia sia stata «agitata» dopo la formazione del sistema solare, forse da qualcuno degli stessi processi ipotizzati per spiegare il limite esterno.

I KBO hanno colorazione variabile: alcuni sono gli oggetti più rossi di tutto il sistema solare, altri tendono a un grigio chiaro. Per quanto sia stato fatto molto lavoro per misurare il colore dei KBO, ci sono poche conclusioni definite. Sembra che quelli che percorrono orbite circolari nel piano del sistema solare tendano a essere rossi. Alcuni ricercatori hanno proposto che la colorazione possa essere associata a collisioni. Se lasciati indisturbati, i KBO tenderebbero lentamente ad arrossarsi con il tempo, in quanto verrebbero «cotti» dai raggi cosmici galattici e dalla radiazione ultravioletta di alta energia proveniente dal Sole. Le collisioni potrebbero portare in superficie materiale di colore grigio presente nell'interno. Di conseguenza oggetti che hanno subito collisioni recenti potrebbero presentarsi grigi, mentre quelli con le superfici più vecchie apparirebbero più scuri e più rossi. Altri hanno ipotizzato che la distribuzione di colore osservata sia un residuo della formazione del sistema solare: i colori differenti corrisponderebbero a differenze locali nel chimismo e nella composizione della nebulosa solare primordiale. È noto come i composti predominanti nei corpi planetari siano estremamente variabili: i pianeti interni sono per lo più rocciosi, mentre i «giganti gassosi» esterni sono fatti di gas e ghiaccio. Se alcuni KBO si fossero formati vicino a Giove e in seguito fossero migrati oltre Nettuno, e altri si fossero invece formati nella zona dove si trovano oggi, sarebbe logico aspettarsi di osservare differenze di colore e composizione tra queste due popolazioni.

Sappiamo assai poco sulla superficie dei grandi KBO, oltre al fatto che il loro colore varia ampiamente e che su alcuni sembra essere presente ghiaccio d'acqua (come rivelano studi spettroscopici). Ciò in effetti non è sorprendente, dato che i KBO sono ritenuti parenti delle comete, la cui composizione è ricca di ghiaccio. Purtroppo le informazioni sulla composizione superficiale dei KBO sono scarse, perché anche i più brillanti di questi oggetti sono difficili da studiare da Terra. Le migliori indicazioni sull'aspetto della superficie di un KBO sono state ottenute nel 1989, quando la sonda Voyager II passò in prossimità di Tritone, il grande satellite di Nettuno, diversi anni prima che fosse scoperto il primo KBO.

Di fatto, Plutone, il suo satellite Caronte, Tritone e la fascia di Kuiper potrebbero essere più strettamente imparentati di quanto si ritenesse inizialmente. Molti ricercatori hanno considerato la possibilità che Plutone possa essere classificato come il più grande dei KBO, anziché come un pianeta. (Nel 2000 il Rose Center for Earth and Space di New York, per esempio, ha depennato Plutone dall'elenco dei pianeti.) In effetti c'è una ventina di KBO che hanno orbite molto simili a quella di Plutone. Caronte si formò probabilmente da una collisione tra Plutone e un KBO nel sistema solare primordiale: sarebbe quindi un prodotto dei KBO. Tritone, per via della sua orbita «retrograda» intorno a Nettuno (che procede cioè in senso contrario rispetto alle orbite degli altri satelliti di Nettuno e dei pianeti del sistema solare), è ritenuto un KBO catturato e convertito in un satellite di Nettuno. Inoltre Tritone viene spesso indicato come un possibile analogo di Plutone in quanto a caratteristiche superficiali. La superficie di Plutone verrà esplorata quando la missione della NASA *New Horizons*, diretta verso Plutone e la fascia di Kuiper, visiterà il piccolo pianeta nel 2015.

Molti KBO sembrano anche avere piccoli satelliti. Questi sono spesso molto lontani dall'oggetto a cui sono appaiati - tra 10.000 e 100.000 chilometri - e relativamente grandi: circa un terzo del diametro del KBO. La distanza in rapporto alle dimensioni è simile a quella del sistema Terra-Luna. Il che è assai sorprendente, dato che i KBO hanno tipicamente circa un milionesimo della massa terrestre. L'esistenza di questi sistemi è del tutto inesplicabile chiamando in causa meccanismi di collisione simili a quelli usati per spiegare la formazione della Luna: questa sarebbe nata dall'impatto di un corpo delle dimensioni di Marte con la Terra.

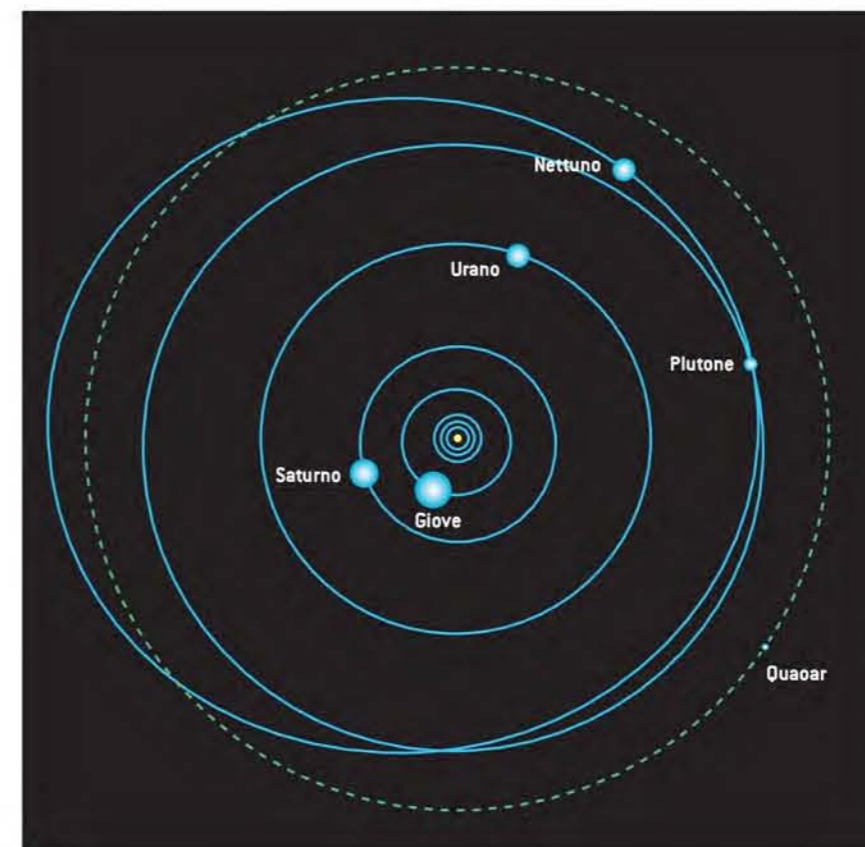
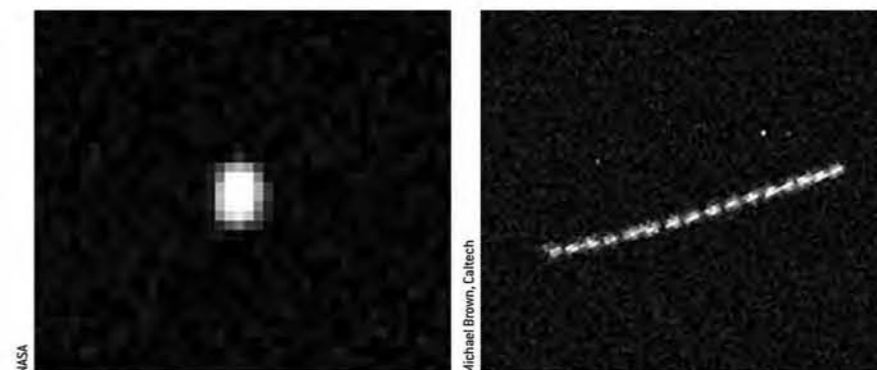
Questo assortimento di misteri è particolarmente inquietante, poiché non è neppure chiaro se sia possibile arrivare sperimentalmente a una spiegazione definitiva delle osservazioni. Molte caratteristiche della fascia di Kuiper sono probabilmente vestigia della formazione del sistema solare, e finora sappiamo davvero poco su che cosa sia accaduto nelle sue regioni più esterne. I teorici tentano di produrre modelli con simulazioni dinamiche di corpi in accrescimento nella fascia di Kuiper. Il paradigma standard vuole che i KBO si siano formati dalla coalescenza di corpi più piccoli, forse di un chilometro di diametro, nelle prime fasi della storia del sistema solare. A un certo punto, comunque, ci fu un drastico cambiamento nelle proprietà della fascia di Kuiper, tale da arrestare la crescita dei singoli KBO. Potrebbe essere stato questo l'evento, o la serie di eventi, che sconvolse la fascia così da renderla più spessa e da produrne il limite esterno.

Possiamo, in realtà, fare un'osservazione che chiarisce fino a che punto si sia spinto il processo di crescita: possiamo cioè cercare i KBO più grandi. Questo ci indicherebbe la dimensione massima che un oggetto avrebbe potuto raggiungere prima che avesse fine l'aggregazione. Ma non si tratta di un compito da poco: significa scrutare l'intera volta celeste.

Cortesia dell'autore

LA SCOPERTA DEL PIÙ GRANDE KBO CONOSCIUTO, chiamato Quaoar, ha comportato il confronto di tre immagini CCD riprese a distanza di alcune ore. I computer scandiscono le immagini del cielo, ricercando oggetti in movimento rispetto allo sfondo fisso di stelle, ma è necessaria l'interpretazione di un osservatore umano per confermare le scoperte. Ciascuna immagine rappresenta solo una piccola frazione del cielo (forse 1/3500 o meno) che viene ripreso ogni notte. In queste immagini Quaoar (*nel cerchio*) si sta spostando da sinistra a destra relativamente alle stelle. Per apprezzare l'impercettibile movimento si presti attenzione alla stella a ore 4 sul cerchio verde.

NASA

Michael Brown, Caltech

QUAOAR È L'OGGETTO PIÙ LONTANO DEL SISTEMA SOLARE MAI RISOLTO DA UN TELESCOPIO: dista circa 6,5 miliardi di chilometri dalla Terra. L'immagine ottenuta dallo Hubble Space Telescope (*in alto a sinistra*) ha consentito una misurazione diretta del suo diametro: 1250 chilometri. Il 5 luglio 2002, mentre l'oggetto si spostava nel cielo in un periodo di 29 minuti, sono state riprese sedici istantanee di Quaoar (*in alto a destra*), che ha una delle orbite più circolari che si conoscano nel sistema solare (*in basso*).

In cerca di KBO

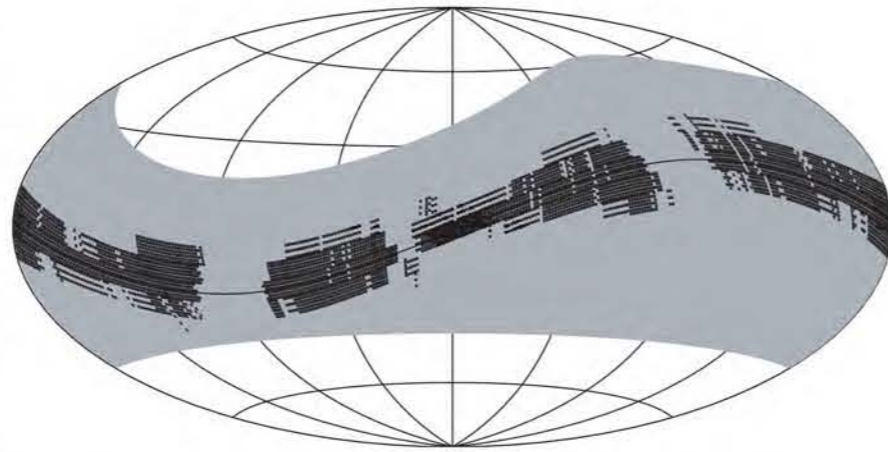
I KBO più grandi sono anche i più luminosi, sicché non occorre usare telescopi particolarmente potenti. Tuttavia la ricerca è difficile per il semplice motivo che il cielo è immenso. Per avere un'idea del compito, si pensi che un telescopio professionale a grande campo capace di rilevare i KBO più brillanti copre un'area che è circa un terzo del diametro della Luna piena, pari a 0,2 gradi di estensione. Ci vogliono più o meno 150.000 Lune piene per riempire il cielo: perciò, se si registrasse un'esposizione a grande campo al minuto, occorrebbero quasi sei anni di notti limpide per scandagliare il cielo intero. I miei colleghi e io siamo impegnati nella ricerca di grandi KBO usando un telescopio con un campo visuale estremamente ampio e una fotocamera digitale che copre quasi tre

gradi quadrati: approssimativamente 10 volte l'area della Luna piena.

La fotocamera è di quelle, ormai diffuse, a dispositivo ad accoppiamento di carica, o CCD, uno strumento che può cogliere deboli immagini astronomiche in una frazione del tempo necessario con un'ordinaria pellicola. Queste fotocamere presentano tre vantaggi rispetto alla fotografia convenzionale: sono circa 100 volte più sensibili ai fotoni, sono molto sensibili alla luce rossa e le immagini registrate con un'esposizione CCD si scaricano direttamente su un computer, facilitando così l'elaborazione successiva.

Il nostro gruppo sfrutta una procedura semiautomatica, in cui è necessario un intervento umano assai limitato. E ciò ha un profondo impatto sulla ricerca dei KBO, perché una macchina è molto più rapida (e meno soggetta a errori) di una persona. Molti grandi KBO, compreso Quaoar, sono stati scoperti in questo modo. Tre immagini della stessa piccola area di cielo vengono riprese in sequenza, a intervalli di circa 90 minuti. Ogni esposizione dura circa 2,5 minuti, che è nulla se paragonato alle molti notti di esposizione necessarie per rivelare le galassie più distanti. Ogni immagine è analizzata da un algoritmo automatico, che identifica oggetti apparentemente in movimento durante la sequenza temporale. Insieme agli oggetti che davvero si muovono, si identificano molti falsi positivi. Ed è per questo che un astronomo deve osservare le immagini per scartare le «false scoperte». Questo approccio semiautomatico è lo stesso usato da molti astronomi che cercano asteroidi vicini alla Terra e potenzialmente pericolosi.

Negli anni più recenti, il processo di ricerca è stato facilitato anche dallo sviluppo di telescopi robotici. Questi strumenti hanno la capacità di operare in autonomia, esaminando una piccola parte del cielo e quindi spostandosi sistematicamente al bersaglio successivo. Per lo più si tratta di sistemi opto-meccanici del costo di molti milioni di dollari, cui si aggiungono altri milioni di dollari in strumentazioni elettroniche, il tutto alloggiato in rivestimenti protettivi. Tuttavia, anche se alcuni telescopi hanno la capacità di chiudersi automaticamente in cattive condizioni atmosferiche, devono quasi sempre essere sorvegliati da un operatore.

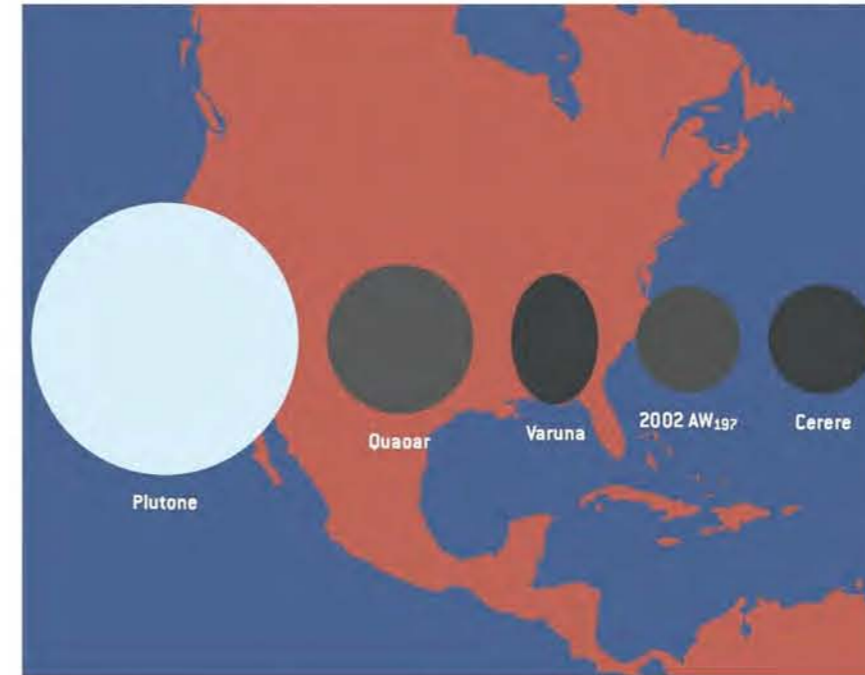
Per la nostra ricerca dei KBO usiamo il Palomar Oshin Telescope, dotato di uno specchio del diametro di 1,2 metri: uno strumento minuscolo, rispetto ai giganti da 8-10 metri che sono stati costruiti nell'ultimo decennio. Comunque si tratta di un telescopio affidabile, in funzione dal 1948. Per fortuna, è stato di recente perfezionato con l'intervento del Near Earth Asteroid Tracking Program (NEAT), destinato alla ricerca di asteroidi che potrebbero entrare in collisione con la Terra. Adesso effettua le proprie esposizioni roboticamente, ripartendo il tempo, senza soluzione di continuità, tra il nostro rilevamento e il programma NEAT.

IL RILEVAMENTO SU LASTRA FOTOGRAFICA compiuto da Clyde Tombaugh tra il 1929 e il 1945 coprì circa il 70 per cento del cielo (*in grigio*) e condusse alla scoperta di Plutone. Si stima che Tombaugh abbia trascorso 7000 ore a scrutare le lastre in cerca di oggetti in movimento. Plutone fu la sua sola scoperta al margine del sistema solare. Il rilevamento dei grandi KBO intrapreso dall'autore e dai suoi colleghi a partire dal 2001 ha coperto una porzione di cielo molto inferiore (*in nero*), ma può «vedere» oggetti 100 volte più deboli di Plutone, e ha permesso finora la scoperta di 30 KBO. L'eclittica (*linea nera*) individua il piano del sistema solare, dove la concentrazione dei KBO è massima.

La combinazione di un telescopio semiautomatico e di un software di analisi consente di effettuare rilevamenti a grande scala con il minimo intervento umano. Il nostro rilevamento, che in un anno e mezzo ha coperto circa 5000 gradi quadrati (circa un ottavo del cielo) può essere gestito da un solo astronomo con l'aiuto di una piccola squadra di manutenzione. Per scovare Plutone, Clyde Tombaugh trascorse 14 anni a esaminare visivamente 30.000 gradi quadrati di lastre fotografiche... Alla velocità attuale, dovremmo riuscire a coprire l'intero cielo in circa 12 anni, con strumenti 50 volte più sensibili di quelli usati da lui.

Quaoar e i grandi KBO

Quaoar è circa 100 volte più luminoso (alle lunghezze d'onda del rosso) di un KBO tipico, e circa due volte più brillante dell'oggetto che lo segue per luminosità. Ma allora perché non è stato scoperto prima del giugno 2002? Quaoar è appena poco meno luminoso di quanto sarebbe stato necessario perché Tombaugh lo scoprisse, ma si può pensare che altri rilevamenti condotti nel XX secolo lo potessero individuare. E, infatti, un'occhiata ai precedenti rilevamenti mostra che altri ne avevano registrato la presenza, sebbene non lo avessero riconosciuto per quel che era perché non stavano cercando oggetti in movimento, o almeno non in movimento così lento (e quindi così lontani). In alcuni casi, Quaoar era ai limiti della sensibilità del rilevamento. Per quanto sia un KBO luminoso, è pur sempre 100 volte più debole di Plutone, che è considerato un oggetto molto difficile da osservare anche con i più grandi telescopi amatoriali.

La determinazione delle dimensioni di Quaoar non è un compito facile. Il telescopio registra la posizione e la luminosità dell'oggetto, ma occorre adattare un'orbita ad almeno tre posizioni osservate per produrre una stima della distanza. Noi osserviamo Quaoar grazie alla luce che ha percorso 6,5 miliardi di chilometri dal Sole alla superficie del KBO, e quindi è stata riflessa verso la Terra per altri 6,3 miliardi di chilometri. Conoscendo la distanza di Quaoar e la quantità di luce da esso riflessa verso il telescopio, possiamo farci un'idea generale delle sue dimensioni. Ma dato che non conosciamo l'albedo di Quaoar (una piccola superficie coperta di neve può riflettere la stessa quantità di luce di un'area molto più vasta, ma coperta di carbone), questa tecnica è relativamente rozza.

Un modo per risolvere l'ambiguità consiste nel misurare il calore emesso. L'emissione termica di un oggetto ci dice quanta luce abbia assorbito, e pertanto quanto oscura sia la sua superficie. Queste misurazioni sono state eseguite grazie al radiotelescopio spagnolo IRAM, da 30 metri. La misurazione è difficile, perché i KBO sono oggetti molto freddi (circa 42 kelvin), e solo cinque o sei dei più grandi possono essere misurati con una certa precisione in questo modo. Combinando queste misurazioni con le nostre osservazioni ottiche della posizione e della luminosità, abbiamo stimato che Quaoar abbia un diametro di circa 1300 chilometri.

PLUTONE E I QUATTRO PIÙ GRANDI PIANETINI potrebbero trovare posto sul continente nordamericano. Plutone è il pianeta più piccolo, e viene spesso considerato come l'oggetto maggiore della fascia di Kuiper. Quaoar e 2002 AW_{197} sono stati scoperti dall'autore e dai suoi colleghi durante la loro ricerca di KBO particolarmente luminosi. Varuna è un grande KBO che ruota intorno al proprio asse così rapidamente da esserne deformato. Cerere, scoperto nel 1801, è il più grande oggetto della fascia degli asteroidi tra Marte e Giove. I toni di grigio rappresentano la luminosità superficiale relativa degli oggetti: Plutone appare piuttosto luminoso, rispetto agli altri corpi, a causa del ghiaccio di azoto che ne ricopre la superficie. Secondo le stime degli autori, le regioni esterne del sistema solare potrebbero ospitare una decina di KBO ancora ignoti di dimensioni paragonabili a quelle di Plutone.

L'AUTORE

CHADWICK A. TRUJILLO è un borsista al California Institute of Technology. Ha contribuito alla scoperta di oltre 100 oggetti della fascia di Kuiper, compreso quello che finora è il più grande e brillante: Quaoar. I suoi interessi di ricerca comprendono la fascia di Kuiper, gli studi sul sistema solare, i pianeti extrasolari e le applicazioni delle ottiche adattative in astronomia. Il suo indirizzo e-mail è: chad@gps.caltech.edu

Per quanto questa tecnica possa soffrire di distorsioni sistematiche, disponiamo di un modo indipendente per verificare le misurazioni. Quaoar infatti è grande a sufficienza perché lo Hubble Space Telescope lo possa risolvere in un disco. Confrontando la sua dimensione apparente (circa 1,5 pixel) con quella di una stella (che è praticamente puntiforme, avendo un diametro di zero pixel) siamo stati in grado di determinare che Quaoar ha circa 1250 chilometri di diametro. Una misurazione così precisa è difficile da eseguire, poiché occorre una grande familiarità con il sistema ottico di Hubble. Il confronto con la stella è essenziale per dimostrare che abbiamo tenuto conto delle distorsioni create nelle ottiche di Hubble, anche se, dopo l'installazione correttiva COSTAR, del 1993, è diventato uno dei telescopi più precisi al mondo.

Dove sono i super-Plutoni?

Nessuno dei 10 KBO più grandi e luminosi è stato scoperto prima del 2000. E dato che solo una piccola porzione del cielo è stata esaminata alla ricerca di questi KBO brillanti, è plausibile che ne restino ancora diversi da scoprire. Sebbene il nostro rilevamento abbia individuato il KBO più grande dalla scoperta di Plutone, possiamo dire di avere coperto solo una parte della superficie osservata da Tombaugh, e una frazione ancora più piccola dell'intero cielo. Ci auguriamo di poter continuare il nostro lavoro fino a coprire circa la stessa area di cielo di Tombaugh, ma dovremmo essere in grado di rilevare oggetti 50 volte più deboli. Pur avendo ottenuto immagini solo di un ottavo del cielo, e di circa un quinto della parte di cielo in cui è più probabile trovare KBO (cioè quella più vicina al piano del sistema solare), finora abbiamo scoperto circa 30 oggetti brillanti. Con 1250 e 900 chilometri rispettivamente, Quaoar e 2002 AW_{197} sono quelli di diametro maggiore.

Con la nostra ricerca nei rimanenti quattro quinti del cielo, ci attendiamo di trovare un totale di circa 100 KBO brillanti, e forse 10 KBO con un diametro dell'ordine dei 1000 chilometri. La distribuzione dimensionale nella fascia di Kuiper è tale che, per ogni 15 oggetti trovati di un dato diametro, se ne troverà uno di diametro doppio. Così, fra i 10 KBO aventi diametro dell'ordine dei 1000 chilometri, è possibile che ve ne sia uno di circa 2000 chilometri di diametro, vicino cioè alle dimensioni di Plutone. Il nostro rilevamento dovrebbe essere completato nel 2005, e con un po' di fortuna un corpo delle dimensioni di Plutone potrebbe apparire nei nostri dati.

Un'altra possibilità è la scoperta di un oggetto molto grande, forse addirittura come Marte. Il cielo non è stato adeguatamente scandagliato in cerca di oggetti di queste dimensioni a distanze estreme dal Sole, pari al doppio di quella dell'anello principale della fascia di Kuiper. Se laggiù vi fossero uno o due di questi super-Plutoni, essi sarebbero senza dubbio sfuggiti al rilevamento di Tombaugh per la loro debolezza, e a tutti gli altri rilevamenti sensibili ai KBO a causa della piccola porzione di cielo esaminata.

BIBLIOGRAFIA

TOMBAUGH C. W., *The Search for the Ninth Planet, Pluto* in «Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific», 5, p. 73, 1946.

KOWAL C. T., *A Solar System Survey* in «Icarus», 77, pp. 118-123, 1989.

JEWITT D. e LUU J., *Discovery of the Candidate Kuiper Belt Object 1992 QB_1* in «Nature», 362, pp. 730-732, 1993.

TRUJILLO C. A. e BROWN M. E., *The Radial Distribution of the Kuiper Belt* in «The Astrophysical Journal Letters», 554, pp. L 95-L 98, 2001.

TRUJILLO C. A., JEWITT D. e LUU J., *Properties of the Trans-Neptunian Belt: Statistics from the Canada-France-Hawaii Telescope Survey* in «The Astronomical Journal», 112, pp. 457-473, 2001.

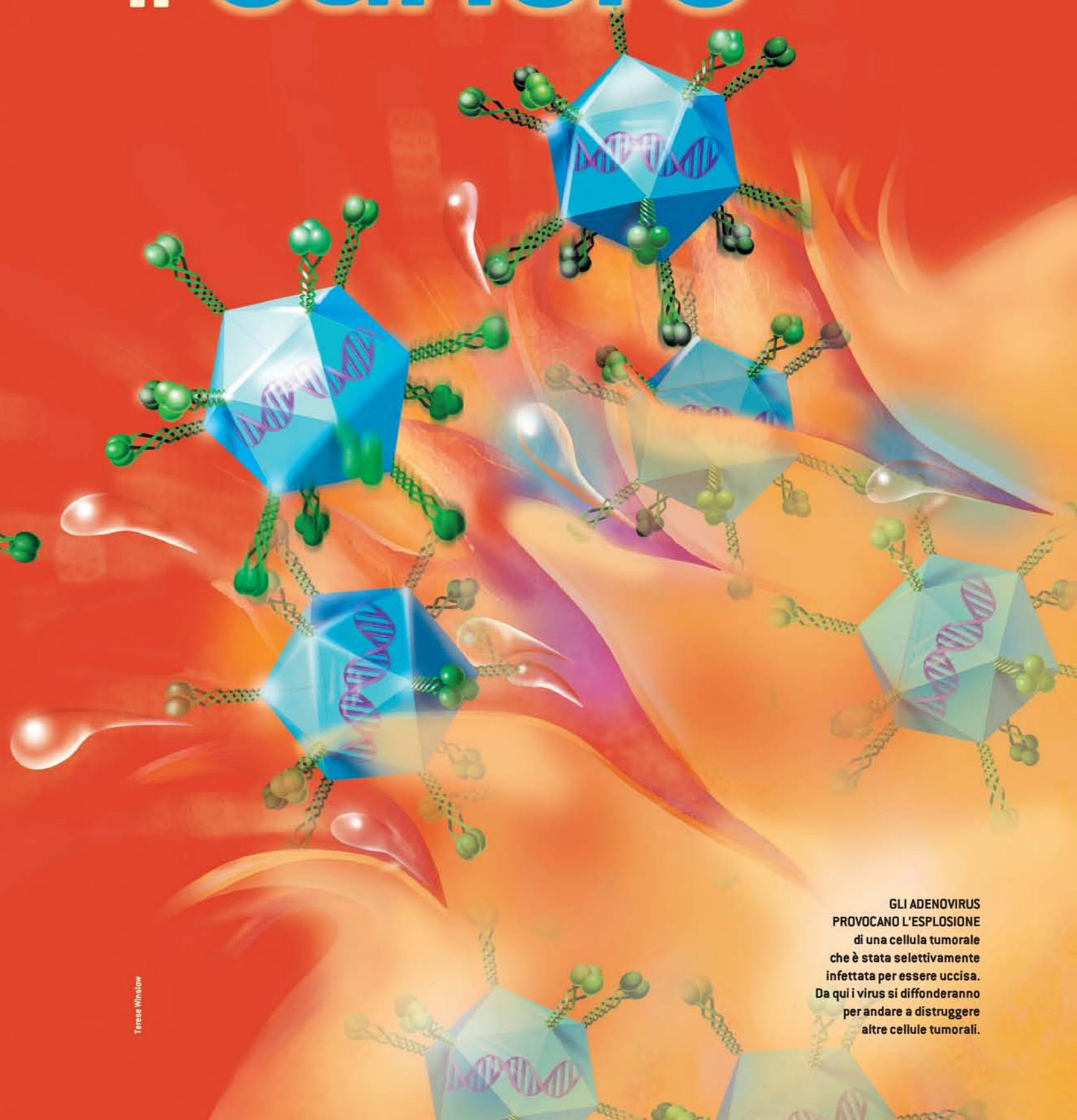
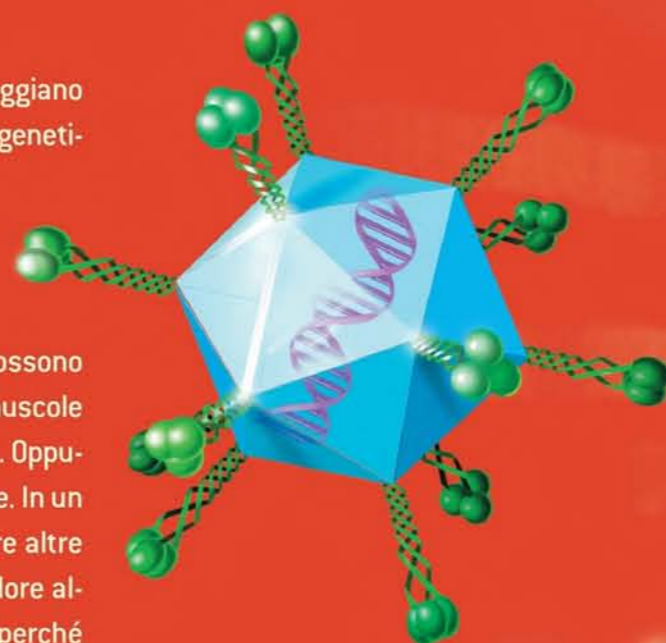
TRUJILLO C. A., LUU J., BOSH A. ed ELLIOT J., *Large Bodies in the Kuiper Belt* in «The Astronomical Journal», 122, pp. 2740-2748, 2001.

Virus contro il cancro

La viroterapia è una nuova tecnica che sfrutta le capacità dei virus, di solito dannose, per bloccare un'altra piaga del genere umano: il cancro

di Dirk M. Nettelbeck e David T. Curiel

I virus sono tra le creature più insidiose della natura. Viaggiano leggeri: equipaggiati unicamente del proprio materiale genetico, strettamente impacchettato in un guscio proteico cristallino, si agganciano alle cellule, vi inseriscono i propri geni e sfruttano i meccanismi di copiatura genica e sintesi proteica dell'ospite per produrre miliardi di repliche di se stessi. Una volta formati, i nuovi virus possono migrare verso la superficie della cellula e incistarsi in minuscole vescicole della sua membrana per poi allontanarsi da essa. Oppure possono continuare a riprodursi finché la cellula esplode. In un modo o nell'altro, essi continuano a infettare e distruggere altre cellule, causando malattie che vanno dal comune raffreddore all'AIDS. Ogni virus provoca una malattia differente, anche perché penetra in un particolare tipo di cellule attaccandosi a un recettore specifico, una sorta di «attracco», presente proprio sulla superficie di quelle cellule e non di altre. Le cellule del fegato hanno un particolare tipo di recettore, a cui si lega una certa famiglia di virus, mentre le cellule nervose ne hanno un altro, usato da una famiglia virale differente. E così pure, ciascun tipo di virus infetta una particolare varietà di ospite. Da anni chi si occupa di ricerca sul cancro invidia questa capacità di selezione: se fosse possibile indirizzare le terapie anticancro solo verso le cellule tumorali, evitando di danneggiare quelle sane, si potrebbero eliminare molti dei peggiori effetti collaterali di quelle terapie.

Terese Winslow

GLI ADENOVIRUS PROVOCANO L'ESPLOSIONE di una cellula tumorale che è stata selettivamente infettata per essere uccisa. Da qui i virus si diffonderanno per andare a distruggere altre cellule tumorali.

Alcuni scienziati – e tra essi il nostro gruppo – stanno applicando le tecniche dell'ingegneria genetica a un certo numero di virus che agiscono come missili in grado di dirigersi autonomamente sul proprio bersaglio: infettano e uccidono selettivamente le cellule tumorali e lasciano indenni quelle sane. Questa nuova strategia, chiamata viroterapia, si è dimostrata promettente nei test su animali di laboratorio, tanto che attualmente sono in corso sperimentazioni cliniche su pazienti umani. I ricercatori stanno valutando la viroterapia come nuovo mezzo per somministrare i chemioterapici tradizionali solo alle cellule tumorali. Etichettando questi virus con marcatori radioattivi o fluorescenti, è anche possibile rintracciare i gruppi di cellule tumorali migrate in punti distanti dal tumore primario: le cosiddette metastasi, che vanno ad annidarsi negli organi più diversi. Finora, comunque, questi esperimenti di marcatura sono stati condotti solo con virus parzialmente inattivati, ovvero resi incapaci di replicarsi.

COME COLPIRE IL MELANOMA

Il melanoma, un cancro della pelle, è uno dei tumori maligni più aggressivi e pericolosi, a meno che non venga riconosciuto molto precocemente: insorge per la crescita e la diffusione incontrollate di cellule pigmentate della pelle, i melanociti. Si sta usando il nuovo approccio della viroterapia per uccidere selettivamente le cellule di melanoma lasciando intatte le cellule sane. Una tecnica per studiare il melanoma prevede la combinazione di cellule di melanoma (*punti neri nella microfotografia in basso a sinistra*) con le normali cellule della pelle chiamate cheratinociti e con collagene per produrre artificialmente un cancro della pelle che può essere messo in coltura in laboratorio. Uno di noi (Nettelbeck) ha messo a punto con alcuni colleghi un adenovirus che può entrare specificamente nelle cellule di melanoma. Nella microfotografia al centro e in quella a destra, i cheratinociti sani appaiono in verde, mentre le cellule infettate con i virus sono colorate in rosso. La microfotografia al centro è stata ottenuta usando virus che non erano specificamente indirizzati contro melanomi. I virus erano in grado di entrare in cellule sane, facendole apparire gialle. I virus preparati per aggredire solo le cellule tumorali (*a destra*), invece, non penetrano in alcuna cellula sana.

Dirk M. Nettelbeck, Università di Erlangen, e N. Sanjib Banerjee, Thomas R. Broker e Louise, T. Chow Università dell'Alabama, Birmingham

Virus soccorritori?

Uno dei primi indizi del fatto che i virus potessero essere utili per combattere il cancro si ebbe nell'ormai lontanissimo 1912, quando un ginecologo italiano osservò la regressione del cancro della cervice uterina in una donna a cui era stato inoculato un vaccino antirabbico ottenuto da una forma viva, parzialmente inattivata, di virus della rabbia (De Pace N., *Sulla scomparsa di un enorme cancro vegetante del collo dell'utero senza cura chirurgica*, in «Ginecologia» 9, pp. 82-89, 1912).

I medici iniettarono intenzionalmente per la prima volta virus in malati di cancro verso la fine degli anni quaranta, ma solo pochi pazienti sembrarono trarne beneficio. Vent'anni più tardi si scoprì che un virus in grado di provocare una patologia di interesse veterinario, la malattia di Newcastle, mostrava una tendenza a infettare cellule tumorali, e si iniziò così a tentare di rafforzare questa tendenza mantenendo i virus in coltura, per generazioni, in cellule tumorali umane. Sebbene i critici obiettassero che tali virus erano in grado di esercitare solo un'azione indiretta contro il cancro, attraverso una stimolazione generale del sistema immunitario che rendeva più probabile l'identificazione e l'uccisione delle cellule tumorali, continuarono a uscire pubblicazioni che suggerivano un legame tra infezione virale e remissione del cancro. All'inizio degli anni settanta e negli anni ottanta due gruppi di medici descrissero pazienti i cui linfomi erano regrediti in seguito a infezione di morbillo.

IN SINTESI

- La viroterapia è una nuova strategia di cura del cancro, che mira a infettare e uccidere selettivamente le cellule tumorali. I ricercatori stanno mettendo alla prova vari approcci per indirizzare i virus – in particolare adenovirus – contro le cellule tumorali, lasciando intatte le cellule normali.
- I virus utilizzati in viroterapia possono uccidere direttamente le cellule tumorali oppure possono liberare in esse geni che le rendono più sensibili a chemioterapia e radioterapia tradizionali.
- Gli stessi tipi di virus usati in viroterapia possono anche essere contrassegnati con marcatori. Dato che questi virus, liberati nell'organismo, si dirigono verso le cellule tumorali, in futuro potrebbero servire a individuare la presenza di minuscoli tumori secondari, o metastasi, eventualmente annidati in diverse parti del corpo del paziente.

Il moderno concetto di viroterapia ebbe origine alla fine degli anni novanta. Allora, le équipe guidate da Frank McCormick, della Onyx Pharmaceuticals di Richmond, in California, e da Daniel R. Henderson, della Calydon di Sunnyvale, sempre in California, pubblicarono indipendentemente rapporti su come erano riusciti a indirizzare la viroterapia verso cellule tumorali umane impiantate in topi, riuscendo a eliminare i tumori umani. Entrambi i gruppi avevano utilizzato ceppi di adenovirus, la causa del comune raffreddore, già ampiamente studiati. (Altri virus presi in considerazione sono per esempio quelli dell'herpes simplex, i parvovirus, i virus del vaiolo vaccino e i reovirus.) Il vantaggio offerto dagli adenovirus è legato al fatto che se ne conosce bene la biologia, dopo anni di tentativi per la cura del raffreddore, e che questi virus sono usati negli esperimenti di biologia molecolare. Un adenovirus consiste di un rivestimento proteico a 20 facce, il capside (che contiene il DNA), dal quale sporgono 12 «bracci» proteici. Queste sporgenze si sono evolute nei millenni per aderire a un recettore cellulare la cui funzione normale sarebbe quella di aiutare le cellule ad aderire le une alle altre.

Gli adenovirus sono diversi dai virus a cui si ricorre normalmente in terapia genica per curare le malattie ereditarie. La terapia genica utilizza di solito retrovirus per aggiungere in modo permanente una copia funzionante di un gene nelle cellule di un paziente in cui quel gene ha cessato di funzionare correttamente. A differenza di questi, gli adenovirus non integrano il proprio DNA nei geni delle cellule che vanno a infettare: i geni che essi trasportano si attivano solo per un breve periodo, per poi cessare di funzionare. Gli scienziati hanno studiato ampiamente gli adenovirus in vista di una terapia genica del cancro, nella quale i virus vengono «armati» con geni che rendono le cellule tumorali più sensibili di quelle normali alla chemioterapia o alle radiazioni. In generale, i test condotti con adenovirus si sono rivelati sicuri. Solo una volta, nel 1999, un volontario è purtroppo deceduto, dopo avere ricevuto un'inoculazione di adenovirus nel corso della sperimentazione clinica di una potenziale terapia genica per una malattia genetica del fegato.

Numerosi gruppi di ricerca lavorano per adattare gli adenovirus e altri vettori virali in modo da migliorarne la sicurezza e da ridurre le probabilità che una simile tragedia possa verificarsi ancora. Sviluppare vettori più sicuri e più specifici è importante per chi, come noi, studia la viroterapia, dal momento che questa, per definizione, mira a uccidere le cellule infettate dai virus, e non si limita a inserire un gene terapeutico all'interno di esse. Uccidere le cellule sbagliate potrebbe essere pericoloso.

Gli adenovirus hanno caratteristiche che li possono rendere più rischiosi o più sicuri a seconda delle circostanze. Quasi tutti si sono trovati esposti almeno una volta agli adenovirus, così tutti noi abbiamo anticorpi prodotti dal sistema immunitario specificamente per distruggerli. Di conseguenza, l'inoculazione di una carica di adenovirus come terapia anticancro potrebbe causare forti sintomi di tipo influenzale, qualora l'organismo riconoscesse questi virus e mettesse in atto una violenta risposta immunitaria per annientarli. (Naturalmente, spazzare via i virus significherebbe vanificare la terapia.) Al tempo stesso, il riconoscimento da parte del sistema immunitario assicura che i virus non si riproducano in modo incontrollato. Al momento sono in fase di progettazione diversi approcci terapeutici per contenere al minimo le possibilità che la viroterapia con adenovirus causi effetti collaterali. Queste strategie comprendono la somministrazione di immunosoppressori in concomitanza con la viroterapia e la modificazione degli adenovirus in modo che non inneschino una reazione immunitaria.

Dritto sul bersaglio

Sono due le strategie principali che si stanno mettendo a punto per essere sicuri che i nuovi «missili» colpiscano con precisione gli obiettivi designati, senza produrre «danni collaterali». Con il «targeting trasduzionale», si cerca di adattare i virus in modo che infettino di preferenza – o trasferiscano i propri geni a – cellule tumorali. Il secondo metodo, il «targeting trascrizionale», comporta l'alterazione dei virus in modo che i loro geni possano diventare attivi soltanto nei tumori (*si veda l'illustrazione alle pagine 42 e 43*).

Il targeting trasduzionale è stato suggerito dal fatto che, sfortunatamente, gli adenovirus si legano con più efficienza a tutta una varietà di tessuti normali dell'organismo di quanto non facciano con la maggior parte delle cellule tumorali. Però è possibile capovolgere questo comportamento, usando molecole di adattamento appositamente generate, fatte di anticorpi in grado di aderire ai bracci del virus. Ancorando ai bracci del virus anticorpi scelti con cura o molecole che si legano solo a una specifica proteina presente sulle cellule tumorali, possiamo far sì che gli adenovirus non siano in grado di infettare una cellula, a eccezione di quelle cancerose. Una volta che un virus legato all'anticorpo si fissa a una cellula bersaglio, questa lo ingloba per endocitosi: vale a dire, lo circonda con una vescicola di membrana che viene poi trascinata all'interno. Quando la vescicola si disintegra, il capside virale migra fino a un canale nella membrana nucleare attraverso il quale inietta il proprio DNA. Entrato nel nucleo, il DNA virale induce la cellula a produrre copie di se stesso, a sintetizzare proteine virali e a combinare DNA e proteine in miliardi di nuovi adenovirus. Quando la cellula è piena di questi invasori, il virus attiva un «gene della morte» e induce la cellula a esplodere, consentendo ai nuovi virus di raggiungere altre cellule.

Ma i virus si possono ingegnerizzare anche in modo più deciso. Uno di noi (Curiel) e Victor Krasnych, virologo del Gene Therapy Center dell'Università dell'Alabama, hanno progettato adenovirus che si legano a proteine cellulari chiamate integrine. Queste molecole aiutano le cellule ad aderire a quella rete di tessuto connettivo, chiamata matrice extracellulare, che serve a organizzare le cellule in tessuti coerenti. Per quanto le integrine siano prodotte anche dalle cellule sane, le cellule tumorali ne producono sempre più in abbondanza via via che divengono metastatiche e iniziano a spingersi attraverso gli strati tissutali, migrando attraverso l'organismo. Il gruppo dell'Università dell'Alabama ha avuto risultati incoraggianti usando virus ingegnerizzati in topi ai quali erano stati impiantati tumori delle ovaie umani. I virus interferivano con le cellule del tumore ovarico e le uccidevano, liberando dalla malattia gli animali trattati.

In questo caso, il «puntamento del bersaglio» si avvale generalmente di interruttori genici (promotori) che dettano la frequenza di attivazione di un determinato gene (dando luogo alla proteina per cui codifica) in un particolare tipo di cellula. Sebbene tutte le cellule dell'organismo contengano la stessa «enciclopedia» di informazione genica, ogni tipo di cellula usa i vari «capitoli» dell'enciclopedia con frequenza diversa, al fine di svolgere i propri compiti specializzati. Le cellule della pelle chiamate melanociti, per esempio, devono produrre una quantità molto maggiore del pigmento melanina rispetto alle cellule epatiche,

LA DISTRUZIONE DELLE CELLULE TUMORALI CON I VIRUS

Per la viroterapia, si stanno valutando due strategie principali. Nel primo metodo, chiamato targeting trasduzionale, i ricercatori stanno tentando di ingegnerizzare virus – come gli adenovirus, che normalmente causano infezioni respiratorie – per infettare e distruggere selettivamente solo le cellule rivelatesi cancerose. Si cerca di «agganciare» molecole di adattamento sulle proteine del rivestimento virale esterno per impedire al virus di entrare nelle cellule normali e per consentirgli al contrario di dirigersi su quelle tumorali. Il secondo approccio comporta il collocamento di un pezzettino di DNA, il promotore tumore-specifico, in prossimità di uno dei geni essenziali dell'adenovirus. Il promotore agisce come interruttore di accensione che permette al gene di funzionare nelle cellule tumorali e solo in esse. I virus ingegnerizzati possono entrare nelle cellule normali, ma non possono riprodursi, e quindi non le uccidono. Una volta che entrano nelle cellule tumorali, invece, il promotore tumore-specifico fa sì che essi producano milioni di copie di se stessi e in definitiva facciano esplodere le cellule cancerose. A quel punto possono diffondersi ad altre cellule tumorali per distruggerle, e così via.

VIROTERAPIA CON TARGETING TRASCRIZIONALE

Adenovirus ingegnerizzato con promotore specifico per il tumore legato a un gene virale essenziale

Promotore

La cellula esplode, e il virus può infettare e uccidere altre cellule tumorali

L'infezione si verifica ma la cellula normale non ha un interruttore per accendere il gene virale, così il virus non può replicarsi e uccidere la cellula

CELLULA NORMALE

CELLULA TUMORALE

DNA VIRALE

DNA DELLA CELLULA

Promotore specifico per il tumore

La cellula tumorale ha un interruttore per accendere i geni della replicazione virale

Terese Winslow

MA È SICURA?

Molti approcci alla viroterapia impiegano gli adenovirus, che hanno causato la morte di un volontario in una sperimentazione clinica di terapia genica quattro anni fa.

Nel settembre 1999 il diciottenne Jesse Gelsinger morì dopo che gli era stata inoculata nel fegato una certa quantità di adenovirus. Soffriva di una malattia epatica ereditaria chiamata deficit di ornitina transcarbamilasi (OTCD) e stava partecipando alla sperimentazione clinica di una terapia genica in cui gli adenovirus venivano impiegati per trasportare agli epatociti una copia corretta del gene che codifica per l'enzima di cui era carente. Purtroppo, quattro giorni dopo la somministrazione, morì per una sindrome di insufficienza respiratoria acuta e per insufficienze di altri organi, apparentemente causate dalla reazione immunitaria alla grande dose di adenovirus ricevuta.

Per quanto il decesso di Gelsinger si sia verificato in una sperimentazione clinica di terapia genica, la tragedia ha implicazioni anche per il nuovo campo della viroterapia. La terapia genica usa versioni inattivate di virus, come gli adenovirus, per introdurre un nuovo gene nelle cellule; la viroterapia impiega virus in grado di replicarsi attivamente (che possono contenere geni aggiunti, o no) per uccidere tipi specifici di cellula. Entrambe le terapie, comunque, si basano sull'uso di adenovirus.

L'autopsia di Gelsinger ha rivelato che gli adenovirus ingegnerizzati si erano diffusi alla milza, ai linfonodi e al midollo osseo, e un esame più accurato ha rivelato che la sua funzione epatica era probabilmente troppo compromessa perché egli potesse essere accettato come volontario nel programma di sperimentazione. Alcuni ricercatori hanno anche suggerito che nel paziente si possa essere scatenata una reazione immunitaria così intensa perché precedentemente già infettato da adenovirus presenti in natura.

Dopo la morte di Gelsinger, gli sperimentatori si sono concentrati ancora di più sul trattamento degli adenovirus, per renderli più sicuri. Ma non sono ancora sicuri del perché Gelsinger abbia reagito così violentemente all'infusione adenovirale: un secondo paziente, che partecipava alla stessa sperimentazione clinica, aveva ben tollerato una dose di virus simile. E decine di altre persone in tutto il mondo sono già state trattate con adenovirus senza manifestare seri effetti collaterali.

Un rapporto dei National Institutes of Health, stilato dopo il decesso di Gelsinger, raccomanda che tutti i partecipanti a sperimentazioni cliniche simili siano monitorati attentamente per individuare reazioni negative prima e dopo la somministrazione di virus terapeutici. Lo stesso rapporto stabilisce che i volontari debbano essere sottoposti a screening per individuare un'eventuale predisposizione che possa aumentarne la sensibilità ai virus.

MBR/KRT

JESSE GELSINGER, morto nel 1999 dopo la somministrazione di adenovirus.

che di quella proteina non se ne fanno un gran che. Di conseguenza, il promotore per l'enzima di importanza critica ai fini della produzione di melanina è attivato nei melanociti, ma è generalmente disattivato nella maggior parte degli altri tessuti dell'organismo. Nel melanoma, micidiale cancro della pelle, il gene che codifica per questo enzima è pienamente funzionale, e fa sì che il tumore appaia di colore nero. Noi, e altri, abbiamo ingegnerizzato adenovirus in modo che presentino un promotore per questo enzima adiacente a geni essenziali per la capacità del virus di replicarsi. Sebbene questi virus siano teoricamente in grado di infettare cellule normali, come le cellule del fegato, essi possono riprodursi solo all'interno dei melanociti, che contengono la speciale combinazione di proteine necessaria per l'attivazione del promotore.

Attualmente si sta cercando di adattare adenovirus con una varietà di promotori che ne limitano l'attività a particolari organi o tessuti. Nei tumori del fegato, per esempio, il promotore del gene α-fetoproteina – normalmente disattivato a sviluppo fetale terminato – si riattiva. Gli adenovirus contenenti quello stesso promotore si sono rivelati promettenti per l'eradicazione dei tumori epatici. Alcuni ricercatori, diretti da Jonathan W. Simons della Johns Hopkins University di Baltimora, hanno sperimentato questo approccio in soggetti che presentavano recidive del cancro della prostata dopo trattamento radioterapico. Hanno ingegnerizzato adenovirus in modo che contenessero il promotore per l'antigene specifico della prostata, una proteina prodotta in abbondanza dai tumori prostatici. E quindi hanno somministrato la viroterapia a 20 pazienti che hanno ricevuto dosi variabili di adenovirus. Nel 2001 Simons e colleghi hanno riferito che nessuno dei pazienti sottoposti all'esperimento ha lamentato seri effetti collaterali, e che i tumori dei cinque pazienti trattati con le dosi più alte di viroterapia si sono ridotti di almeno il 50 per cento.

Infine, si potrebbero combinare le strategie di targeting trasduzionale e trascrizionale per assicurare che i virus uccidano solo cellule tumorali e non cellule normali. Gli adenovirus ingegnerizzati per contenere il promotore per l'enzima che produce la melanina, per esempio, possono replicarsi in melanociti normali come pure in cellule di melanoma, perciò potrebbero causare chiazze di pigmentazione. E gli adenovirus progettati per legarsi a recettori sulla superficie di cellule tumorali possono ancora invadere una piccola proporzione di cellule sane. Ma virus alterati in modo da avere numerosi meccanismi a prova di errore dovrebbero avere una probabilità molto minore di nuocere alle cellule normali. Al momento, comunque, non vi sono risultati tali da dimostrare che una combinazione dei due approcci renda i virus più specifici per un dato bersaglio.

I ricercatori stanno anche armando virus terapeutici con geni capaci di rendere particolarmente suscettibili alla chemioterapia le cellule infettate. Questa tecnica comporta il montaggio nei virus di geni che codificano per enzimi capaci di convertire precursori non tossici, o «pro-farmaci» in chemioterapici tossici. In un caso, descritto nel 2002, André Lieber dell'Università di Washington e i suoi collaboratori hanno progettato adenovirus per trasportare geni codificanti per enzimi capaci di convertire pro-farmaci innocui nei composti anticancro camptotecina e 5-fluorouracile. Hanno ingegnerizzato i virus in modo che questi potessero produrre gli enzimi soltanto in cellule in corso di divisione attiva, quali le cellule tumorali. Quando hanno iniettato i virus e i pro-farmaci in topi che recavano cellule impiantate del cancro del colon umano o del cancro della cervice uterina, hanno riscontrato che i virus si riproducevano e si diffondevano nei tumori.

Quello che vedi...

Queste viroterapie «intelligenti» sono un assaggio di futuro. Ma i medici dovranno anche essere in grado di seguire l'attività della viroterapia nell'organismo di un paziente per controllare quanto queste strategie funzionino e per poterle ulteriormente perfezionare. Gli specialisti di questo settore collaborano inoltre con i radiologi per mettere a punto nuove tecnologie di *imaging* in grado di misurare facilmente con quanta efficacia si stia replicando un determinato agente viroterapico. E stanno adattando queste tecniche per evidenziare metastasi in fasi di sviluppo ancora estremamente precoci.

Le strategie di imaging comportano l'inserimento, in un virus, di un gene che governa la produzione di una molecola tracciante. Il tracciante può essere sia una proteina fluorescente, che può essere osservata direttamente, sia una proteina che si lega ai radionuclidi usati nelle tecniche standard di imaging diagnostico. La proteina fluorescente potrebbe essere più utile per evidenziare i tumori accessibili per via endoscopica, come il tumore della laringe. I medici potrebbero scrutare nell'endoscopio e osservare esattamente, grazie alla fluorescenza, dove si trovino i virus e pertanto le cellule tumorali. Finora l'approccio, comunque, si è rivelato più funzionante con virus che non uccidono le cellule. Nondimeno, siamo persuasi che simili tecnologie di imaging consentiranno ai ricercatori di trarre conclusioni più significative dalle future sperimentazioni cliniche della viroterapia.

MAPPA DELLE AZIENDE CHE PUNTANO SULLA VIROTERAPIA

Società	Sede centrale	Virus	Malattie	Modificazioni virali	Status di sperimentazione clinica
BioVex	Milton Park, Oxfordshire, UK	Virus dell'Herpes simplex (HSV)	Cancro della mammella e melanoma	Trasporta il gene per il fattore di stimolazione delle colonie di granulociti e macrofagi, uno stimolante del sistema immunitario	Fase I/II
Cell Genesys	San Francisco, California	Adenovirus	Cancro della prostata	Mirato alle cellule tumorali della prostata usando promotori specifici	Fase I/II
Crusade Laboratories	Glasgow	HSV	Glioma (cancro del cervello), cancro della testa e del collo, melanoma	Ha una delezione genica che ne limita l'azione alle cellule che si dividono attivamente, come quelle cancerose	Fase II per il glioma e il cancro della testa e del collo; Fase I per il melanoma
Medigene	Martinsried, Germania	HSV	Glioma e cancro del colon con metastasi	Presenta due delezioni geniche che gli impediscono di riprodursi in cellule normali	Fase II per il glioma; Fase I per le metastasi del cancro del colon
Oncolytics Biotech	Calgary, Alberta, Canada	Reovirus	Cancro della prostata e glioma	È in grado di replicarsi solo in cellule tumorali che rechino l'oncogene attivato *ras*	Fase II per il cancro della prostata; Fase I/II per il glioma

NOTA: I test di fase I sono concepiti per valutare la sicurezza in piccoli numeri di pazienti. I test di fase II e fase III mirano a determinare, rispettivamente, la dose appropriata e l'efficacia.

GLI AUTORI

DIRK M. NETTELBECK e DAVID T. CURIEL hanno iniziato la loro collaborazione presso il Gene Therapy Center dell'Università dell'Alabama a Birmingham (UAB), dove Curiel dirige la divisione di terapia genica umana. Curiel è anche professore di terapia genica presso la Libera Università di Amsterdam. Nettelbeck, che dirige un gruppo di ricerca dedicato alla viroterapia del melanoma maligno presso il Dipartimento di dermatologia dell'Università di Erlangen, in Germania, è un biologo molecolare che ha conseguito il Ph.D. nel 2000 presso l'Università Philipps di Marburgo, in Germania, ed è stato premiato con un riconoscimento della Fondazione Novartis per la ricerca terapeutica.

BIBLIOGRAFIA

ALEMANY R., BALAGUE C. e CURIEL D. T., *Replicative Adenoviruses for Cancer Therapy*, in «Nature Biotechnology», 18, pp. 723-727, 2000.

ETTELBECK D. M., JÉRÔME V. e MÜLLER R., *Gene Therapy: Designer Promoters for Tumour Targeting*, in «Trends in Genetics», 16, pp. 174-181, 2000.

CURIEL D. T. e DOUGLAS J. T. (a cura), *Adenoviral Vectors for Gene Therapy*, Academic Press, San Diego, 2002.

CURIEL D. T. e DOUGLAS J. T. (a cura), *Vector Targeting for Therapeutic Gene Delivery*, John Wiley & Sons, 2002.

KRESINA Thomas F. (a cura), *An Introduction to Molecular Medicine and Gene Therapy*, John Wiley & Sons, 2002.

RING C.J.A., *Cytolytic Viruses as Potential Anti-Cancer Agents*, in «Journal of General Virology», 83, pp. 491-502, 2002.

Database delle sperimentazioni cliniche di terapia genica del «Journal of Gene Medicine»: www.wiley.com/legacy/wileychi/genmed/clinical/

American Society of Gene Therapy: www.asgt.org

Energia nucleare dal torio

Questo articolo è stato pubblicato originariamente su «American Scientist», vol. 91, n. 5, settembre-ottobre 2003, con il titolo *Thorium Fuel for Nuclear Energy*.

Un approccio non convenzionale alla costruzione dei reattori potrebbe attenuare le preoccupazioni sull'uso dei combustibili esausti ai fini della produzione di bombe

Cortesia British Energy

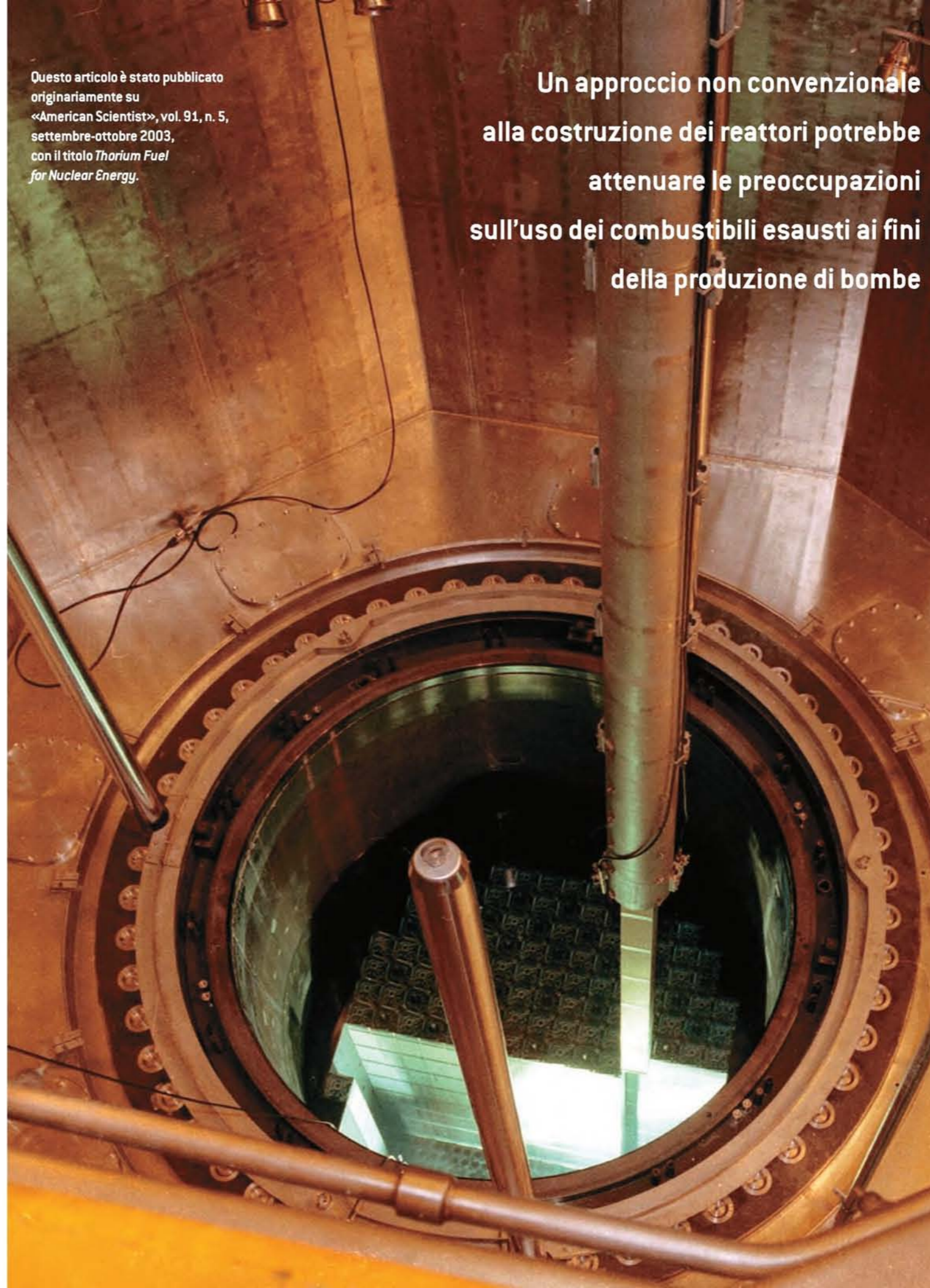
di Mujid Kazimi

L'URANIO ALIMENTA LA MAGGIOR PARTE dei 441 reattori nucleari in funzione nel mondo (103 negli Stati Uniti), che insieme producono il 16 per cento di tutta l'elettricità del pianeta. Nella maggior parte delle installazioni, le pastiglie di ossido di uranio riempiono sottili barre di combustibile, normalmente disposte in schiera quadrata entro ciascun gruppo combustibile. Un moderno reattore nucleare ospita circa 200 di tali gruppi nel proprio nocciolo. Questi vengono periodicamente sfilati e sostituiti, e il combustibile esausto può subire ritrattamento oppure essere immagazzinato. Una caratteristica preoccupante di questo sistema di generazione elettrica è che esso produce plutonio, che può essere estratto chimicamente dal combustibile esausto e usato per la costruzione di armi nucleari. L'uso del torio, oltre all'uranio, nel combustibile può ridurre questo pericolo: i combustibili a base di torio producono plutonio in quantità molto minore, e la composizione isotopica dello stesso plutonio è inadatta per la fabbricazione di ordigni. Data questa possibilità di ostacolare la proliferazione di armi di distruzione di massa, unitamente alla grande abbondanza di torio nella crosta terrestre, di recente è stata ripresa in considerazione l'opzione torio, abbandonata da decenni nella maggior parte del mondo.

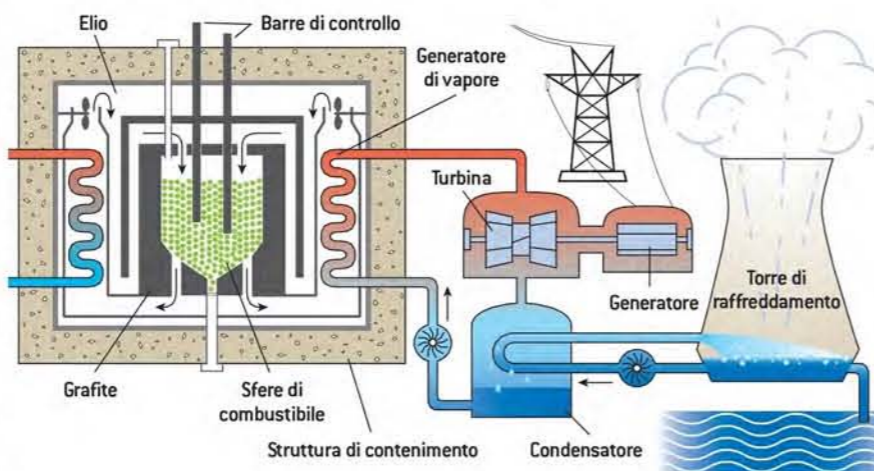
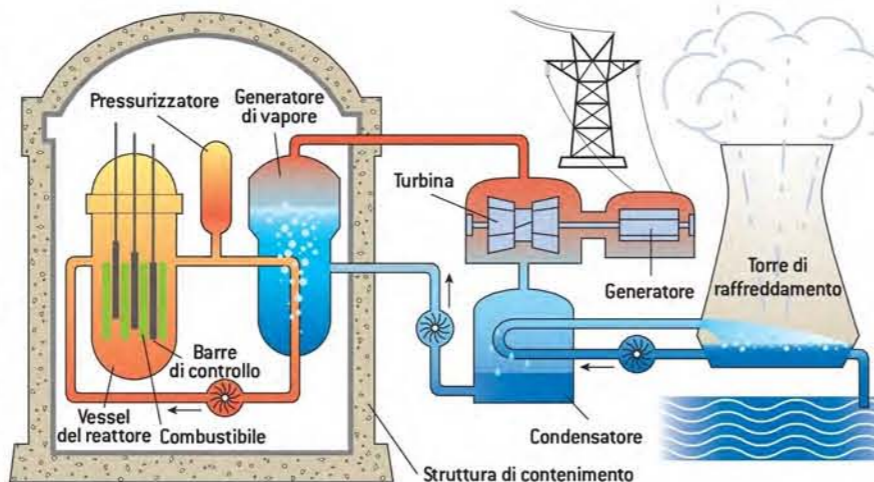
In che modo un gruppo terroristico potrebbe appropriarsi dell'uranio o del plutonio necessari a produrre una bomba atomica? Questa domanda ha turbato i sonni di non pochi esperti in materia di nucleare. Il modo più facile consiste probabilmente nel comprarli. Magari dalla Corea del Nord, che, secondo i bollettini informativi, potrebbe avere i mezzi per produrre una piccola riserva di materiale fissile di interesse bellico. Anche se le aspirazioni nucleari di Pyongyang sono state molto evidenziate dagli organi di informazione, da più di un anno a questa parte, gli esperti si preoccupano anche del fatto che altre nazioni poco affidabili possano entrare in possesso di queste armi terrificanti. L'esempio nordcoreano è, comunque, piuttosto ben definito, e i suoi dettagli mettono in luce un annoso problema di sicurezza internazionale, del tipo di quelli che gli ingegneri nucleari come me vorrebbero tanto contribuire a risolvere. Quasi dieci anni or sono il mondo tirò un sospiro di sollievo quando molti sforzi diplomatici, compresi quelli dell'ex presidente Jimmy Carter, disinnescarono quello che minacciava di diventare un violento conflitto: all'epoca, la Corea del Nord stava interferendo con il lavoro di monitoraggio dell'Agenzia internazionale per l'energia atomica (IAEA), in chiara violazione degli obblighi contratti come firmataria del Trattato di non proliferazione nucleare. In particolare, i nordcoreani asserivano di avere prodotto appena una minuscola quantità di plutonio a partire dal combustibile esausto estratto dai loro reattori nucleari: troppo poco per realizzare anche una sola bomba.

Tuttavia, non si consentiva agli ispettori la verifica di questa affermazione.

Ma perché, innanzitutto, la Corea del Nord stava sottoponendo a ritrattamento combustibili nucleari? Dopotutto, ciò che esce dagli impianti civili non richiede alcun ritrattamento, come hanno dimostrato gli Stati Uniti e molti altri paesi. (Negli impianti nucleari statunitensi, per esempio, i combustibili esausti vengono semplicemente immagazzinati in fusti o in bacini pieni d'acqua di raffreddamento, in vista del loro smaltimento definitivo nel deposito sotterraneo di Yucca Mountain, nel Nevada, che dovrebbe diventare operativo attorno al 2010.) La decisione, da parte della Corea del Nord, di sottoporre a ritrattamento combustibile nucleare esausto non era forse già una spia piuttosto eloquente dell'intenzione di estrarre il plutonio generato nei reattori civili per impiegarlo nella fabbricazione di bombe?

Non esattamente. I reattori nordcoreani sono del tutto diversi per concezione da

quelli attualmente in funzione negli Stati Uniti, che usano acqua sia come refrigerante sia come moderatore, la sostanza che rallenta i neutroni liberati durante la fissione, consentendo loro di avviare ulteriori reazioni di fissione. I reattori nordcoreani «magnox» (un nome derivato dalla lega di ossido di magnesio che racchiude l'uranio impiegato come combustibile) usano gas come refrigerante e grafite come moderatore, essendo simili a un tipo di centrale per lungo tempo in uso nel Regno Unito. Ora, i combustibili esausti estratti dai reattori magnox non possono essere smaltiti in condizioni di sicurezza: devono essere ritrattati per assumere una forma che sia meno suscettibile di ossidazione in aria o in acqua. Così, il fatto che i nordcoreani stessero ritrattando combustibili esausti non costituiva di per sé la prova di cattive intenzioni. La loro interferenza con il lavoro degli ispettori internazionali era comunque un fatto piuttosto inquietante.

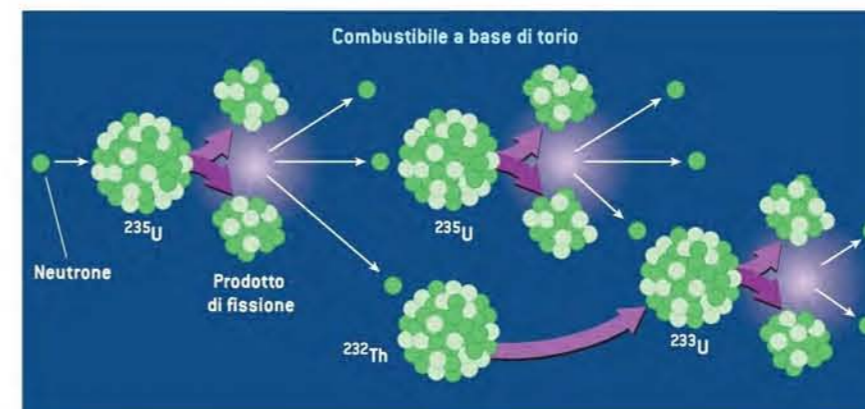
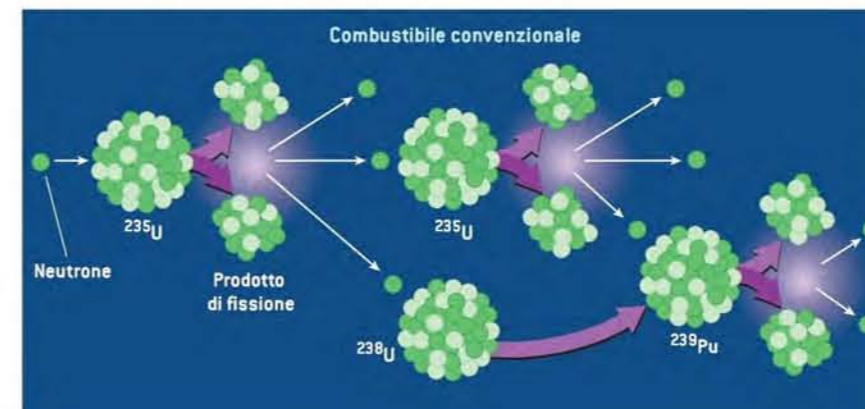
L'accordo che Carter contribuì a stilare attenuò molte preoccupazioni: in cambio della chiusura dei reattori rallentati a grafite, Pyongyang avrebbe ricevuto assistenza da Washington per costruire centrali nucleari del tipo di quelle usate negli Stati Uniti, oltre a un cospicuo pacchetto di aiuti economici. La soluzione era, almeno in parte, di carattere tecnico, poiché si trattava di offrire ai nordcoreani un modo per sviluppare un programma pacifico per la produzione di energia nucleare. Il paese avrebbe quindi potuto continuare a gestire centrali senza provocare preoccupazioni all'estero circa il possibile impiego del plutonio per la realizzazione di bombe.

Naturalmente, in mancanza di supervisione adeguata, i nordcoreani avrebbero comunque potuto usare i loro nuovi reattori per produrre plutonio, ritrattando i combustibili esausti in qualche sito segreto. Di fatto, la loro inclinazione a lavorare clandestinamente per ottenere materiali adatti all'uso bellico è diventata palese lo scorso anno, quando è stato accertato che il Pakistan aveva ceduto alla Corea del Nord centrifughe ad alta velocità – indispensabili per ottenere uranio idoneo alla fabbricazione di armi nucleari – in cambio di tecnologia missilistica. Apparati di questo genere stanno diventando sempre più facili da reperire, e di conseguenza gli sforzi per trasformare l'uranio ordinario nella sua forma altamente arricchita adatta alla produzione di bombe a fissione stanno diventando sempre più ardui da scoprire. Pertanto il mondo si troverà probabilmente a fronteggiare questa minaccia. Ma che dire per ciò che concerne il problema dell'utilizzo bellico dei combustibili esausti?

I COMBUSTIBILI A BASE DI TORIO SONO ADATTI SIA PER I REATTORI AD ACQUA IN PRESSIONE, che usano acqua comune per trasferire calore dal nocciolo e per rallentare i neutroni generati nelle reazioni di fissione (*in alto*), sia per i reattori a gas ad alta temperatura, che usano un gas come l'elio per trasferire calore e grafite solida per rallentare i neutroni (*in basso*). Molti reattori ad acqua in pressione (compreso il primissimo reattore costruito per la generazione elettrica commerciale) funzionavano a torio, nei primi tentativi di prova. E anche alcuni reattori raffreddati a gas ad alta temperatura hanno funzionato con combustibili a base di torio, compreso il tedesco THTR-300, un reattore da 300 megawatt costruito negli anni ottanta nei pressi di Amburgo. Questo reattore era del tipo *pebble-bed* sopra indicato, in cui il combustibile, nella forma di un gran numero di palline, viene collocato in un vessel a forma di tramoggia. Questa disposizione consente di effettuare il rifornimento di combustibile in continuo, evitando i costosi periodi di inoperatività che ciclicamente si rendono necessari per la maggior parte degli impianti nucleari, quando i reattori devono essere spenti per consentire la ricarica del combustibile.

Uno dei principali ostacoli allo sfruttamento per fini militari del combustibile esausto è dato dal fatto che esso rimane altamente radioattivo per secoli dopo la sua collocazione in discarica. Pertanto, perché da esso sia possibile estrarre plutonio, occorrono impianti con schermature adeguate e mezzi per la manipolazione a distanza. Ma si può pensare a soluzioni tecniche efficaci per scongiurare ulteriormente la possibilità che i combustibili nucleari esausti vengano sfruttati a fini militari? È, questa, una domanda che i progettisti di combustibili nucleari si sono posti un'infinità volte. In questa sede, vorrei esplorare una possibile risposta che recentemente ha riguadagnato interesse: il torio.

Più abbondante dell'uranio

L'uso del torio nei reattori è stato preso in considerazione fin dalla nascita dell'energia nucleare negli anni cinquanta, in buona parte perché il torio è notevolmente più abbondante dell'uranio nella

IL COMBUSTIBILE NUCLEARE CONVENZIONALE (*in alto*) contiene sia un isotopo fissile dell'uranio (^{235}U) sia un suo isotopo non fissile (^{238}U). Avviata dalla cattura di un neutrone, la fissione di un nucleo di ^{235}U libera altri due o tre neutroni. Questi a loro volta fanno sì che un altro nucleo di ^{235}U si scinda, oppure possono indurre atomi di ^{234}U a tramutarsi in plutonio 239, che, essendo a sua volta fissile, contribuisce a dare energia al reattore. I combustibili nucleari a base di torio (*in basso*) funzionano per lo più nello stesso modo, ma invece di produrre plutonio a partire da ^{235}U, producono un altro isotopo fissile dell'uranio.

IN SINTESI

- Fin dagli anni cinquanta, fu presa in considerazione l'ipotesi di utilizzare come combustibile il torio, elemento radioattivo più abbondante in natura dell'uranio.
- Bombardando con neutroni il torio, lo si trasforma in uranio-233, specie fissile che può sostenere reazioni a catena. Nel processo, la quantità di scorie prodotta è relativamente limitata. Inoltre, il biossido di torio è un composto molto stabile e con un'ottima conduttività termica.
- Dopo il parziale abbandono di alcuni anni fa, lo sfruttamento del torio come combustibile nucleare è ritornato in auge in reattori di nuova concezione, per prevenire l'accumulo di plutonio e impedire in tal modo la proliferazione di ordigni bellici.

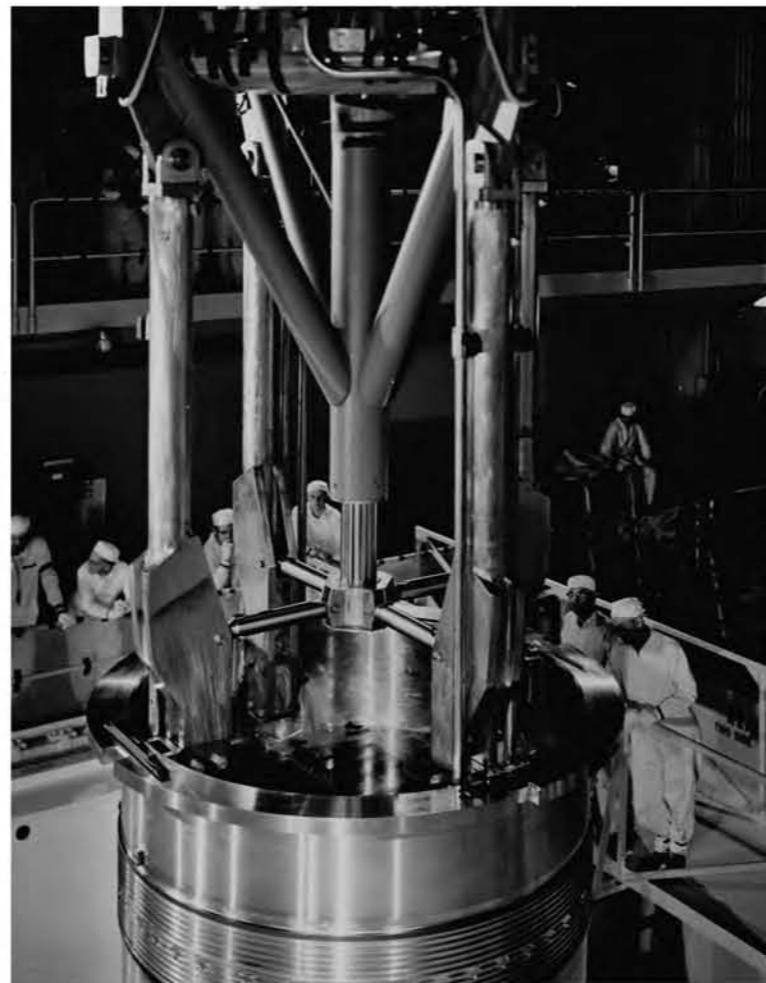
crosta terrestre: ce n'è, grosso modo, il triplo. Sfortunatamente, gli atomi di torio non possono essere facilmente indotti a scindersi, ciò che avviene fondamentalmente in un reattore a fissione. Ma quando una certa quantità di torio-232 (l'isotopo più comune di quell'elemento) viene posta all'interno di un reattore, essa assorbe immediatamente neutroni e si trasforma in uranio-233. Questo, proprio come l'uranio-235 tipicamente usato per generare energia nucleare, può sostenere reazioni di fissione a catena. Il torio viene pertanto considerato «fertile» più che fissile. Sotto questo aspetto è simile all'uranio-238, che costituisce oltre il 95 per cento della maggior parte dei combustibili nucleari. Un reattore convenzionale genera vari isotopi del plutonio a partire dall'uranio-238, e parte di quel plutonio a sua volta subisce fissione nel reattore.

L'intoppo per l'uso del torio come combustibile è che prima che da esso possa essere estratta una qualunque quantità di energia, deve avvenire la generazione di nuovo materiale fissile, e ciò richiede neutroni. Alcuni hanno proposto di utilizzare acceleratori di particelle, per generare i neutroni necessari, ma questo processo è costoso e il solo schema praticabile, almeno al momento, consiste nel combinare il torio con combustibili nucleari convenzionali (costituiti da plutonio o uranio arricchito, oppure da entrambi), la fissione dei quali fornisce i neutroni che servono ad avviare il tutto.

Il *breeding* dell'uranio-233 a partire dal torio è più efficiente del breeding del plutonio a partire dall'uranio-238, poiché lungo il processo si creano meno isotopi non fissili di varia natura. I progettisti possono sfruttare questa efficienza in modo da far diminuire la quantità di combustibile esausto per unità di energia generata, il che riduce la quantità di scorie da smaltire. Ma vi sono anche altri vantaggi. Per esempio, il biossido di torio, la forma usata per produrre energia nucleare, è un composto molto stabile, più del biossido di uranio impiegato normalmente nei combustibili oggi in uso. Vi sono così meno possibilità che le pastiglie di combustibile reagiscano chimicamente con il rivestimento di metallo che le circonda, o con l'acqua di raffreddamento, qualora vi sia una breccia nel rivestimento protettivo. Così pure, la conducibilità termica del biossido di torio è dal 10 al 15 per cento più alta di quella del biossido di uranio, e ciò facilita il flusso termico dalle barre di combustibile usate all'interno di un reattore. Inoltre, il punto di fusione del biossido di torio è circa 500 gradi più elevato di quello del biossido di uranio, e questa differenza offre un ulteriore margine di sicurezza nell'eventualità di un picco transitorio di potenza o in caso di perdita di fluido di raffreddamento.

La conoscenza di tali vantaggi ha stimolato gli ingegneri nucleari a condurre esperimenti, e alcuni gruppi hanno perfino capitalizzato esperienza pratica mettendo in funzione reattori commerciali con combustibili a base di torio. A metà degli anni sessanta, per esempio, nella Pennsylvania sudorientale fu costruito il Peach Bottom Unit One, un reattore raffreddato a gas e moderato a grafite che usava una combinazione di torio e uranio altamente arricchito. Un altro reattore raffreddato a gas, a Fort St. Vrain, in Colorado, rimase in funzione con un combustibile a base di torio dal 1976 al 1989.

Test condotti con miscele relativamente semplici di ossido di torio e ossido di uranio altamente arricchito avevano pure avuto inizio in reattori raffreddati ad acqua durante gli anni sessanta presso gli impianti «BORAX» (in Idaho), di Elk

ALVIN RADKOWSKY È STATO UN PIONIERE nell'uso di combustibile nucleare a base di torio, ed è stato forse il maggior fautore di questa alternativa fino alla sua morte, avvenuta nel 2002. Radkowsky è stato *chief scientist* dello US Naval Reactors Program, sotto la direzione dell'Ammiraglio Hyman Rickover, che viene spesso ricordato come il padre della Marina nucleare. Nel 1954 il loro programma ha prodotto il primo sottomarino a propulsione nucleare, lo USS Nautilus (*in basso a sinistra*). Qui Radkowsky, con gli occhiali, riceve un riconoscimento per i suoi successi tecnici dalle mani di Rickover (*in alto a sinistra*). Dietro di loro si scorge lo schema del primo reattore nucleare progettato specificamente per la generazione commerciale di energia elettrica, costruito presso Shippingport, Pennsylvania, alla fine degli anni cinquanta (*a destra*).

River (in Minnesota) e di Indian Point (nello Stato di New York). E dal 1977 al 1982 combinazioni più complesse di torio e uranio-235 o uranio-233 erano state impiegate in un reattore raffreddato ad acqua a Shippingport, in Pennsylvania, in un programma sperimentale che tentava di sviluppare un combustibile in grado di produrre più materiale fissile di quanto ne consumasse. Fatto interessante, Shippingport, entrato in funzione nel 1957, è stato il primo impianto nucleare costruito negli Stati Uniti per la generazione commerciale di elettricità.

Il lavoro con i combustibili nucleari a base di torio non è rimasto limitato agli Stati Uniti. Gli ingegneri nucleari tedeschi, per esempio, hanno usato combinazioni di torio e uranio altamente arricchito, o torio e plutonio, sia in reattori raffreddati a gas sia in reattori raffreddati ad acqua. Combustibili a base di torio sono stati anche messi alla prova nel Regno Unito, in Francia, Giappone, Russia, Canada e Brasile. Ma, nonostante questi notevoli sforzi iniziali, la maggior parte di questi paesi ha abbandonato da molto tempo l'idea di usare il torio per alimentare le proprie centrali.

Un paese che ha conservato interesse per questa tecnologia è l'India, che verso la metà degli anni novanta ha iniziato ad alimentare con combustibili contenenti torio alcuni dei suoi reattori nucleari. Sebbene una delle ragioni che suggerivano l'impiego del torio fosse semplicemente quella di uniformare la distribuzione di potenza all'interno dei noccioli dei reattori, gli ingegneri indiani hanno colto anche l'opportunità di verificare l'idoneità del torio come fonte di combustibile. I risultati positivi da essi conseguiti hanno motivato i piani orientati all'impiego di combustibili a base di torio in reattori più avanzati, attualmente in fase di realizzazione.

L'attrazione dell'India per i combustibili a base di torio dipende, in parte, dalle grandi disponibilità interne dell'elemento: con riserve di torio stimate in circa 290.000 tonnellate, l'India è infatti seconda solo all'Australia. Ma l'inclinazione a utilizzare il torio, motivata anche dal desiderio di indipendenza da fonti straniere di uranio, è dovuta a ragioni che non hanno nulla a che vedere con la bilancia dei pagamenti: l'India utilizza alcuni dei suoi reattori per produrre plutonio destinato alle bombe atomiche. Pertanto, l'India rifiuta di assoggettarsi alle clausole imposte dai fornitori commerciali di uranio di paesi come il Canada: essi richiedono infatti che gli acquirenti del loro minerale permettano una supervisione sufficiente ad assicurare che il combustibile (o il plutonio da esso ricavato) non vengano usati per la produzione di armi nucleari.

Il precedente lavoro sul torio in altre parti del mondo non ha condotto, alla fine, alla sua adozione, soprattutto perché le sue prestazioni in reattori ad acqua, come il primo nocciolo della centrale di Indian Point, non sono state all'altezza delle aspettative. Dati questi precedenti, potrebbe sembrare sorprendente che i combustibili nucleari a base di torio siano tornati alla ribalta, sia pure come mezzo per contenere la potenziale proliferazione di armi nucleari. L'uso del torio per prevenire l'accumulo di plutonio richiede che il combustibile sia configurato in modo diverso rispetto a quanto si è fatto nella maggior parte degli esperimenti degli anni passati. Quei tentativi prevedevano l'incorporazione di uranio altamente arricchito – ciò che oggi viene scoraggiato, date le preoccupazioni sulla proliferazione – e presupponevano che il combustibile esausto fosse ritrattato per l'estrazione dei suoi contenuti fissili. Nessuna di queste due pratiche è attualmente prevista.

I gruppi combustibili al torio progettati ai giorni nostri sono diversi rispetto al passato anche per altri aspetti. Per esempio, possono sopportare una maggiore esposizione al calore e alla radiazione presenti all'interno del nocciolo, e ciò consente che una maggiore quantità di torio-232 fertile venga convertita in uranio-233 fissile. Insomma: ciò di cui si parla è qualcosa di radicalmente diverso dal combustibile a base di torio di alcuni decenni or sono.

Prevenire il rischio di proliferazione

Come ho accennato, la scarsità di uranio-233 in natura obbliga a utilizzare un materiale fissile differente, come l'uranio-235 (oppure il plutonio-239), per innescare un reattore funzionante a torio. Dati gli attuali divieti all'impiego di combustibili commerciali troppo arricchiti in uranio-235, sarebbe necessario includere nell'innesco una considerevole quantità di uranio-238 (non fissile): almeno l'80 per cento, o più. Come nel caso dei reattori convenzionali, ciò renderebbe impossibile utilizzare il combustibile a scopo bellico senza dover prima procedere all'arricchimento isotopico dell'uranio, che dal punto di vista tecnico è un'operazione piuttosto impegnativa.

Il principale vantaggio dato dall'uso di una combinazione di torio e uranio è la significativa riduzione del contenuto di plutonio del combustibile esausto rispetto a ciò che esce da un reattore alimentato convenzionalmente. Ma quanto plutonio in meno si produce, esattamente? La risposta a questa domanda dipende da come sono combinati l'uranio e il torio.

I COMBUSTIBILI A BASE DI TORIO POSSONO ESSERE PROGETTATI IN MODI DIVERSI. Uno schema generale, concepito per la prima volta da Radkowsky, prevede che ciascun gruppo combustibile (*quadrati*) sia composto da barre di «seme», ricche di uranio, circondate da barre di «mantello», ricche di torio (*in alto*). L'uranio, costituito fino al 20 per cento dell'isotopo fissile ^{235}U, produce abbastanza neutroni da trasformare il torio «fertile» attorno a esso in ^{233}U, un altro isotopo fissile dell'uranio. Questo mescolamento di tipi di combustibile in un gruppo complica la ricarica di un reattore, dal momento che le barre di seme devono essere sostituite più spesso delle barre di mantello. Una configurazione alternativa, chiamata «nocciolo a elementi di combustibile integrati seme-e-mantello» (*in basso*), utilizza gruppi combustibile che contengono ciascuno solo barre di seme, ricche di uranio, o barre di mantello, ricche di torio. Questi gruppi possono essere sfilati più facilmente per essere sostituiti quando necessario.

L'AUTORE

MUJID S. KAZIMI ha conseguito il Ph.D. in ingegneria nucleare nel 1973 al Massachusetts Institute of Technology, dove è attualmente Tokio Electric Power Company Professor of Nuclear Engineering. Sempre al MIT, Kazimi dirige il Center for Advanced Nuclear Energy Systems (CANES), che studia nuovi progetti per la produzione di energia nucleare allo scopo di renderla più economica e sicura, diminuendone l'impatto ambientale e innalzando barriere alla proliferazione di armi nucleari. Indirizzo: CANES, Room 24-215, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (MA), 02139. E-mail: kazimi@mit.edu

L'INDIA È IL SOLO PAESE che stia perseguendo una strategia volta all'impiego di combustibili al torio, perché le permetterebbe di raggiungere una certa indipendenza dai fornitori stranieri di uranio. Il paese detiene infatti quasi un quarto delle riserve mondiali accertate di torio, mentre ha relativamente poco uranio. Sulla mappa sono indicati i paesi che possiedono almeno il cinque per cento delle riserve globali di uranio (*in rosa*) e di torio (*in verde*). Le riserve di torio, però, non sono conosciute quanto quelle di uranio, dato che il suo attuale impiego è decisamente limitato.

Stime della World Nuclear Association

Per esempio, possono essere mescolati in modo omogeneo in ciascuna barra di combustibile. In questo caso la quantità di plutonio prodotto è approssimativamente dimezzata. Ma un mescolamento uniforme non è il solo modo per combinare i due elementi.

Oggi la soluzione che gode di maggiore considerazione presso i tecnici prevede una combinazione che mantiene il «seme», elemento di combustibile ricco di uranio, separato dal «mantello», ricco di torio. Il principale sostenitore di questa configurazione fu il compianto Alvin Radkowsky, un pioniere del nucleare che – in veste di *chief scientist* dello US Naval Reactors Program e sotto la direzione dell'Ammiraglio Hyman Rickover – contribuì alla nascita del primo sottomarino a propulsione nucleare della Marina statunitense, durante gli anni cinquanta. Radkowsky continuò a dare contributi significativi all'industria nucleare civile durante gli anni sessanta e settanta.

Poi, spronato da Edward Teller (uno dei suoi primi maestri) a trovare un modo per ridurre l'eventualità che armi atomiche finissero in mani sbagliate, Radkowsky rivolse la propria attenzione all'uso di combustibili al torio, che egli già aveva riconosciuto come un mezzo per contenere la quantità delle scorie prodotte. Nel 1992 contribuì a fondare la Thorium Power, Inc., una società privata per la commercializzazione di questa tecnica. Purtroppo, Radkowsky non sarebbe vissuto abbastanza per vedere concretizzato il suo progetto: è mancato infatti nel 2002, all'età di 86 anni.

L'idea di Radkowsky era quella di costruire speciali gruppi combustibile che potessero essere utilizzati in normali reattori raffreddati ad acqua con un minimo di modifiche. Queste unità sono costituite da una regione centrale contenente barre di combustibile riempite con uranio idoneo all'uso in reattore (vale a dire, contenente non più del 20 per cento di uranio-235). Intorno al «seme» è posto un «mantello» di barre di combustibile contenenti torio e una piccola quantità di uranio. La presenza di uranio-238 nel mantello è tesa a impedire che qualcuno possa sottrarre queste barre e riesca, solo con mezzi chimici, a separare l'uranio-233 fissile formatosi nel tempo.

Con il sostegno dello US Department of Energy e l'assistenza tecnica del Brookhaven National Laboratory, la Thorium Power sta lavorando con l'Istituto Kurchatov di Mosca per studiare più a fondo questa configurazione. L'idea di fondo prevede l'impiego di una lega metallica come combustibile e il mantenimento delle unità di seme in un reattore russo per tre anni prima di sostituirle, lasciando invece le barre di mantello nel reattore per dieci anni.

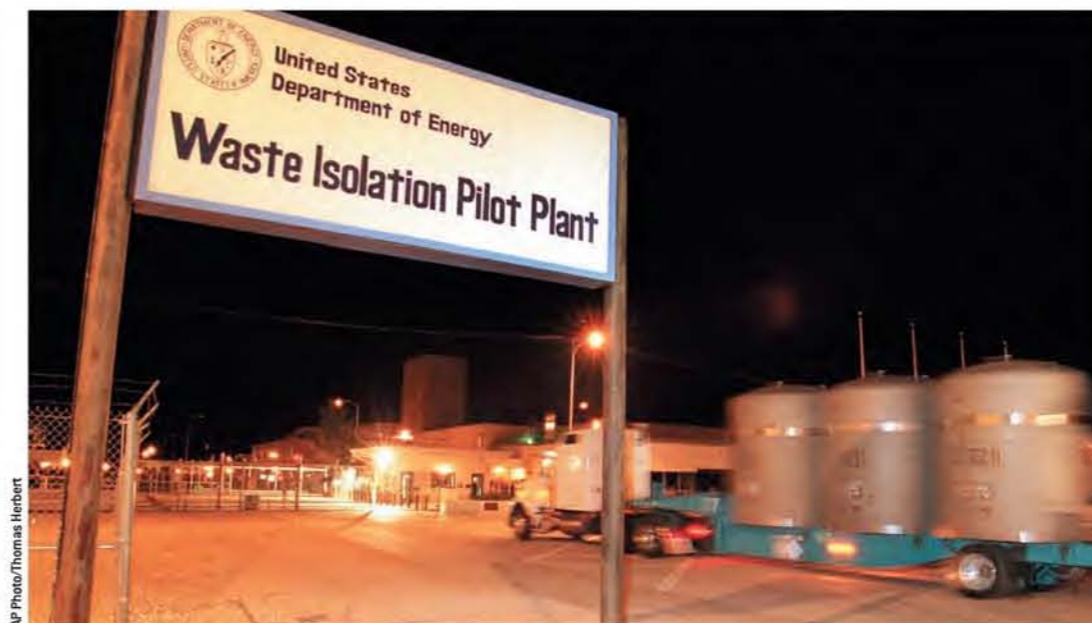
Secondo le previsioni, i risultati di questa collaborazione non potranno comunque essere direttamente applicabili alle centrali nucleari di altre parti del mondo, dato che il materiale combustibile non è nella forma di ossido (come si preferisce in Occidente) e che i reattori russi coinvolti in questi test sono caratterizzati da uno schema esagonale di barre per ciascun gruppo combustibile, mentre la maggior parte delle centrali in funzione nei paesi occidentali presenta uno schema a base quadrata.

Radkowsky e colleghi avevano calcolato che la loro soluzione per le barre di combustibile avrebbe ridotto la quantità di plutonio prodotta dell'80 per cento rispetto a quanto accade in un reattore alimentato convenzionalmente, a parità di energia prodotta. Inoltre, essi avevano scoperto che la miscela di isotopi del plutonio generata, perlopiù nelle barre di seme, non sarebbe stata idonea all'impiego militare, in quanto una bomba fatta con questo materiale avrebbe avuto pochissime probabilità di offrire una grande resa in termini di potenza esplosiva. Infine, il plutonio ha un contenuto talmente alto dell'isotopo ^{238}Pu che il calore generato dal suo decadimento potrebbe essere sufficiente per fondere o danneggiare gli altri materiali utilizzati nella costruzione di un'arma.

Se un gruppo terroristico volesse usare il plutonio del mantello per produrre una bomba terrificante (se non terribilmente potente), l'estrazione di questo plutonio dal combustibile a base di torio progettato da Radkowsky – o, meglio, da un qualunque combustibile a base di torio usato in un reattore – sarebbe più difficile che non la sua estrazione dal combustibile esausto attuale. Il combustibile esausto del mantello contiene uranio-232 che in capo a pochi mesi decade in isotopi che emettono raggi gamma ad alta energia.

Quindi l'estrazione del plutonio richiederebbe un significativo ispessimento delle schermature e un uso più ampio dei dispositivi per la manipolazione remota all'interno dell'impianto di ritrattamento, complicando ulteriormente un compito già di per sé arduo. Inoltre, l'abbondanza di uranio-232 e dei suoi prodotti altamente radioattivi nel combustibile esausto frustrerebbe probabilmente ogni sforzo di separare dall'uranio-238 l'uranio-233 che, essendo fissile, potrebbe a sua volta essere usato per realizzare una bomba.

AP Photo/Thomas Herbert

LO STOCCAGGIO DEL COMBUSTIBILE esausto è uno dei maggiori problemi della produzione di energia nucleare a partire dall'uranio. Anche negli Stati Uniti, prima dell'individuazione e della messa in opera di siti di stoccaggio definitivo, è stato utilizzato quello provvisorio di Carlsbad (*a sinistra*), nel New Mexico, per il plutonio proveniente dal Los Alamos National Laboratory.

Fare i conti con la realtà

Alla luce dei potenziali vantaggi dal punto di vista della riduzione quantitativa delle scorie e della relativa facilità di impedire la diffusione di materiale adatto alla produzione di bombe, non sorprende che l'interesse per i combustibili a base di torio abbia recentemente conosciuto una sorta di *renaissance*. Lo US Department of Energy è stato particolarmente entusiasta di promuovere le attività di ricerca in quest'area. Oltre a finanziare la società di Radkowsky e i suoi partner per i loro esperimenti con i reattori russi, il DOE ha offerto supporto a tre altri progetti più recenti. Uno di questi coinvolge un consorzio costituito da due laboratori statunitensi (l'Idaho National Engineering and Environmental Laboratory e l'Argonne National Laboratory), due società private che si occupano della produzione di combustibili nucleari (Framatome Technologies e Westinghouse) e tre università (l'Università della Florida, la Purdue University e il Massachusetts Institute of Technology). Lo scopo è stato quello di elaborare uno schema per usare torio nei reattori senza la complicazione aggiuntiva di dover trattare configurazioni diverse delle barre di combustibile, come richiesto dal progetto di Radkowsky.

Un altro programma, che ha visto la collaborazione di ricercatori del Brookhaven National Laboratory e del Center for Advanced Nuclear Energy Systems (CANES) del MIT, aveva l'obiettivo di cercare vie praticabili per semplificare la progettazione delle unità separate di seme e di mantello. Questo risultato si potrebbe ottenere costruendo interi gruppi combustibile con la sola funzione di seme o di mantello. Anche se questa terminologia è stata mantenuta (chiamiamo questa disposizione nocciolo a elementi di combustibile integrati seme-e-mantello) la metafora è meno applicabile in questo caso, perché i gruppi devono essere disposti più o meno a scacchiera nel nocciolo del reattore.

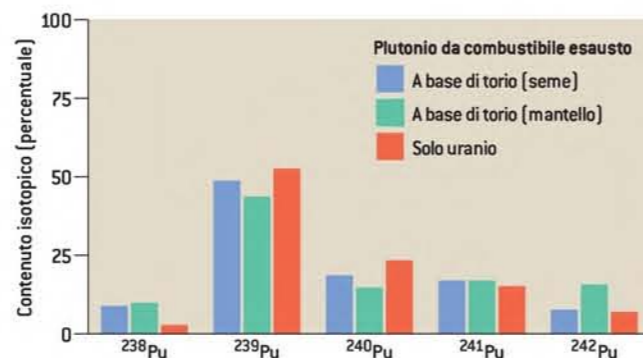
In un terzo progetto di ricerca, ingegneri nucleari di Brookhaven e della Purdue University hanno preso in considerazione l'uso di torio innescato a plutonio come combustibile per reattori ad acqua bollente: questi progetti sono distinti dalla varietà più comune di reattori ad acqua in pressione che mantengono l'acqua di raffreddamento in condizioni di alta pressione in modo che rimanga sempre liquida. L'idea ispiratrice di questo programma è che in questo modo si potrebbe disporre di un mezzo economicamente conveniente per consumare il plutonio in eccesso delle armi senza produrre un'ulteriore generazione di scorie di plutonio, come accadrebbe con il piano principale attualmente contemplato, noto come opzione a ossidi misti. Sotto questo aspetto, la ricerca congiunta Brookhaven-Purdue sul combustibile a base di torio innescato da plutonio è simile a parte del lavoro che la Thorium Power e i suoi partner russi sperano di iniziare.

Nel corso degli ultimi anni, i miei colleghi del CANES e io abbiamo dedicato uno sforzo considerevole alla valutazione dei dettagli dei vari progetti, compresi i modi per combinare uranio e torio all'interno di singole barre di combustibile. Come ci si poteva aspettare, le nostre conclusioni sulla fattibilità tecnica ed economica variano a seconda del particolare progetto considerato. In questa sede vorrei descrivere solo alcuni dei nostri risultati per la configurazione integrata seme-e-mantello, la strategia che a mio modo di vedere ha le maggiori possibilità di successo commerciale.

La bottom line

Anche con un nocciolo a elementi di combustibile integrati seme-e-mantello, dove ciascun tipo di gruppo combustibile è omogeneo, risulta chiaro che la fabbricazione del combustibile e la sua gestione all'interno del reattore sarebbero più complesse del normale. In un tipico reattore nucleare, i gruppi combustibile vengono periodicamente sfilati in modo che ciascuno di essi sia esposto, in media, alle stesse condizioni di calore e radiazione. In un nocciolo integrato seme-e-mantello, i semi devono sostenere livelli di potenza significativamente al di sopra della media, mentre i gruppi di mantello sono soggetti a condizioni di gran lunga meno estreme. Pertanto il combustibile nelle barre di seme raggiunge temperature più alte, rilascia più prodotti gassosi di fissione nello spazio limitato disponibile tra le barre e richiede più raffreddamento che non il combustibile usato nelle barre di mantello.

Queste esigenze possono essere soddisfatte in vari modi, per esempio consentendo a una maggiore quantità di fluido refrigerante di scorrere attraverso i semi e rendendo i materiali combustibili termicamente più conduttivi. Nell'approccio Radkowsky-Kurchatov, le barre di seme sono costituite da una lega di uranio metallico (secondo progetti che sono stati collaudati nei sottomarini russi) e ciò ne migliora la conduttività termica. Nello schema MIT-Brookhaven, le pastiglie di

I REATTORI NUCLEARI GENERANO PLUTONIO come sottoprodotto, il che fa aumentare le preoccupazioni che questo materiale possa essere impiegato per la produzione di armi nucleari. Ma non tutto il plutonio è uguale. Il plutonio idoneo alla preparazione di armi deve essere ricco dell'isotopo ^{239}Pu, e dovrebbe contenere una piccola percentuale dell'isotopo altamente radioattivo ^{238}Pu (*a sinistra*). Il plutonio prodotto dai combustibili nucleari a base di torio è molto meno idoneo all'uso bellico di quello proveniente da un reattore convenzionale raffreddato ad acqua, dato che l'isotopo altamente radioattivo ^{238}Pu è presente in quantità maggiore (*a destra*). I reattori alimentati a torio sono anche convenienti per il fatto di produrre complessivamente meno plutonio. Per esempio, un reattore con nocciolo a elementi di combustibile integrati seme-e-mantello (il tipo considerato per l'istogramma a destra) produrrebbe un totale di 92 chilogrammi di plutonio per gigawatt-anno di elettricità generata, mentre un reattore convenzionale raffreddato ad acqua ne produce 232.

ossido di uranio all'interno delle barre di seme sono cave, il che ne abbassa la temperatura. Per quanto le barre di mantello siano meno problematiche sotto questo aspetto, anch'esse devono essere progettate con molta cura, in modo che il rivestimento esterno tenga bene, dal momento che la durata di vita operativa di queste barre deve arrivare, in alcuni progetti, a 13 o 14 anni.

Oltre a esaminare queste problematiche ingegneristiche, i ricercatori del CANES hanno anche quantificato i vantaggi dei progetti a seme-e-mantello in termini del loro contributo a impedire la proliferazione di materiali di interesse bellico, e hanno anche tentato di valutarne la convenienza economica. Questa ricerca ha permesso di appurare che le disposizioni a seme-e-mantello producono meno plutonio rispetto a soluzioni alternative in cui uranio e torio sono mescolati a scale più piccole. Ma i nostri risultati non sono ottimistici come avevano indicato i primi lavori di Radkowsky: calcoliamo una riduzione solo del 60 per cento (per il sistema integrato) o del 70 per cento (se all'interno di ciascun gruppo sono usate sia barre di seme sia barre di mantello), rispetto alla stima di Radkowsky di una riduzione dell'80 per cento in quest'ultimo caso.

I nostri calcoli sulla produzione del plutonio, comunque, vanno a sostegno delle asserzioni di Radkowsky secondo le quali il combustibile esausto conterrebbe apprezzabili quantitativi di plutonio-238, un isotopo altamente radioattivo, che pertanto produce una grande quantità di calore. Di fatto, il contenuto di plutonio-238 sarebbe da tre a quattro volte più alto di quello dei combustibili convenzionali a uranio. Ma, come Radkowsky aveva sottolineato, il calore irraggiato da questo isotopo renderebbe difficilissimo, se non impossibile, costruire e stoccare un'arma nucleare.

La produzione di quantitativi così ingenti di plutonio-238 dipende dal fatto che viene consumato più combustibile rispetto al caso dei reattori convenzionali alimentati a uranio. Un quantitativo equivalente di plutonio-238 potrebbe essere creato utilizzando un combustibile completamente composto da uranio, ma ciò richiederebbe una quantità iniziale più alta di uranio fissile (^{235}U) di quanto sia tipico nella pratica attuale, e le proiezioni economiche per una scelta del genere sono scoraggianti.

Pertanto il nostro recente lavoro conferma ampiamente che le varie problematiche ingegneristiche possono essere risolte e che reattori alimentati a torio potrebbero effettivamente ostacolare gli sforzi clandestini per produrre bombe a partire dai combustibili esausti. Ma i risultati della nostra ricerca per quanto riguarda l'economia del torio sono meno definiti. Valutiamo che i combustibili a base di torio possano costare dal 10 per cento in meno a circa il 10 per cento in più dei combustibili nucleari convenzionali. Questo ampio margine di errore dipende da incertezze fondamentali sul costo dell'uranio per le barre di seme (che sarebbe quattro volte più ricco di uranio-235 rispetto ai combustibili nucleari tipici), sul costo di fabbricazione dei gruppi combustibile e sui risparmi che potrebbero derivare in futuro grazie alla riduzione quantitativa delle scorie da smaltire.

Per quanto sembri poco probabile che le considerazioni economiche da sole possano indurre all'adozione dei combustibili a base di torio, non esistono grossi impedimenti di natura tecnica. Evidentemente, sarebbero necessarie modifiche alle infrastrutture esistenti, ma fondamentalmente non è richiesta alcuna tecnologia veramente nuova. E il fatto che i materiali coinvolti (torio e uranio arricchito) abbiano una lunga storia di utilizzo sperimentale nei reattori lascia credere che questo approccio possa trovare in futuro un'ampia applicazione, qualora i politici vogliano spingere l'industria nucleare in quella direzione.

BIBLIOGRAFIA

MARK C., *Explosive properties of reactor-grade plutonium*, in «Science and Global Security» 3, 1-13, 1992.

RADKOWSKY A. e GALPERIN A., *The non proliferative light water reactor: A new approach to light water reactor core technology*, in «Nuclear Technology» 124, 215-222, 1998.

GARWIN R.L. e CHARPAK G., *Megawatts and Megatons*, University of Chicago Press, Chicago, 2002.

SHWAGERAUS S., ZHAO X., DRISCOLL M., HEJZLAR P., KAZIMI M.S., HERRING J.S. , *Micro-heterogeneous thoria-urania fuels for pressurized water reactors*, in «Nuclear Technology», in stampa.

Per link di interesse su Internet, si consulti il sito di «American Scientist»: www.americanscientist.org/template/issueTOC/issue/400

Ghiaccio bollente

di Matthew Sturm, Donald K. Perovich e Mark Serreze

GALEN ROWELL/Corbis

LA RIDUZIONE DEI GHIACCI MARINI è uno dei più impressionanti indicatori del cambiamento in corso nell'Artico. La superficie coperta dai ghiacci si è ristretta del tre per cento durante ognuno degli ultimi tre decenni. E lo spessore della coltre è diminuito in proporzione ancora maggiore: in alcune zone, fino al 40 per cento. Questa immagine mostra Resolute Bay, nell'Artico canadese.

I ghiacciai del grande Nord stanno fondendo, il permafrost va in disgelo, nella tundra attecchiscono arbusti e cespugli, e gli scienziati tentano di capire in che modo questi cambiamenti potranno condizionare non solo l'Artico, ma l'intero pianeta

cristalli di neve mi trafiggono il viso, mi coprono tutta la barba e la gorgiera del parka. Con l'infuriare sempre più forte del vento, riesco a malapena a scorgere i miei cinque compagni nella tormenta di neve. Abbiamo ormai percorso 800 dei 1200 chilometri del nostro tragitto in motoslitta attraverso le regioni artiche dell'Alaska. Siamo venuti qui, sul finire dell'inverno del 2002, per misurare lo spessore del manto nevoso e valutarne la capacità isolante, un fattore importante per il mantenimento del bilancio termico del permafrost. Facciamo una breve fermata, per decidere il da farsi. Il vento impetuoso, insieme a una temperatura vicina ai 35 sotto zero, suggerisce di trovare riparo, e anche molto in fretta. Appoggio il viso contro il cappuccio del compagno che mi è a fianco e grido: «Cercate di stare vicini l'uno all'altro. Dobbiamo toglierci da questo crinale esposto al vento!» In quel momento, mi sfuggiva l'ironia del fatto che avremmo potuto morire assiderati proprio mentre andavamo in cerca delle prove del riscaldamento globale. Ma più tardi, fuori dalla tempesta e nel tepore delle nostre tende, cominciai a sorridere al pensiero di quanto sarebbe stato paradossale.

Matthew Sturm

L'elenco è lungo da far paura. Le più alte temperature dell'aria da quattro secoli a questa parte, i ghiacci marini in ritiro, una fusione record della coltre che copre la Groenlandia, la regressione dei ghiacciai dell'Alaska a una velocità senza precedenti. A cui vanno aggiunti l'aumento del deflusso dei fiumi siberiani, una stagione di disgelo che nell'Artico si è allungata di diversi giorni per decennio e il permafrost che ha iniziato a disgelarsi. Prese nel loro complesso, queste osservazioni annunciano – come nessuna da sola potrebbe fare – che l'Artico sta subendo una profonda trasformazione. Questo fatto è stato pienamente dimostrato solo nell'ultimo decennio, da quando gli scienziati di diverse discipline hanno iniziato a confrontare le rispettive scoperte. Ora, molti di loro collaborano, cercando di cogliere le ramificazioni dei cambiamenti e di prevedere a quale destino andranno incontro l'Artico e il resto del globo.

Ciò che essi accerteranno avrà rilevanza planetaria, dal momento che l'Artico esercita una notevole funzione di controllo sul clima globale. Così come lo sfioratore di una diga regola il livello del bacino idrico, le regioni polari controllano il bilancio termico della Terra. Dato che viene assorbita più energia solare ai tropici che non ai poli, i venti e le correnti oceaniche trasportano costantemente calore verso i poli, dove le estese coltri nevose e glaciali influenzano il suo destino. Fino a quando questa copertura, altamente riflettente, è intatta ed estesa, la luce solare che giunge direttamente alle regioni artiche viene per lo più riflessa nello spazio, mantenendo l'Artico freddo e in grado di smaltire il calore pervenuto dalle basse latitudini. Ma se questa coltre inizia a fondere e a ritirarsi, rifletterà una quantità minore di luce solare, e l'Artico smaltirà il calore ricevuto dalle basse latitudini con minore efficienza, conducendo in definitiva al riscaldamento dell'intero pianeta.

Immaginare che cosa potrà accadere, però, è quanto mai difficile. Il fattore di complicazione maggiore è costituito dall'intricato sistema di retroazioni che governa il clima delle regioni artiche. Alcuni di questi processi sono positivi: amplificano, cioè, i cambiamenti, e possono tramutare un colpetto in un urto possente. Altri, invece, sono negativi, e fungono da freno del sistema, mitigando i cambiamenti.

Il più rilevante, tra questi processi, è la retroazione ghiaccio-albedo (*si veda la finestra a pagina 64*). Per causa sua, le temperature in aumento producono inverni più brevi e coperture di neve e ghiaccio meno estese, con un effetto domino che si propaga alle medie latitudini. Un'altra retroazione interessa le grandi quantità di materiale carbonioso congelato nelle regioni artiche sotto forma di torba. Via via che il clima si riscalda, questo materiale, subendo il disgelo, potrebbe liberare biossido di carbonio nell'atmosfera; darebbe così un contributo all'effetto serra incrementando il riscaldamento non solo della regione artica, bensì del globo intero.

Il punto cruciale è che non si riesce ancora a capire con precisione come funzionino, anche presi da soli, alcuni di questi processi di retroazione. Men che mai, ovviamente, sappiamo come interagiscano. Quel che è certo, è che l'Artico è un sistema complesso: cambia una cosa, e tutto il resto risponde, talvolta in modo controintuitivo.

IN SINTESI

- Ovunque, nell'Artico, si trovano tracce di riscaldamento, e ci si attende che i mutamenti in corso abbiano ripercussioni su tutto il pianeta, dato che le regioni polari influiscono in misura notevole sul bilancio termico della Terra.
- Una rete complessa di sistemi di retroazione climatica rende difficile capire se l'effetto serra sia la causa primaria di questa trasformazione.
- Quali che siano le cause dei cambiamenti, gli scienziati si trovano di fronte al compito urgente di prevedere che cosa ci si debba attendere da questa situazione, piuttosto che aspettare di reagire alle conseguenze che via via si manifestano.

Il riscaldamento

Più osserviamo, più cambiamenti riusciamo a scorgere. Le temperature dell'aria artica sono aumentate di 0,5 gradi per decennio nel corso degli ultimi 30 anni, e questo riscaldamento è stato riscontrato prevalentemente in inverno e primavera.

Le registrazioni indirette (come carote di ghiaccio e di torba, sedimenti lacustri), che ci parlano soprattutto delle temperature estive, permettono di collocare questo riscaldamento recente in una prospettiva storica. Esse indicano che le temperature della fine del XX e dell'inizio del XXI secolo sono ai loro livelli più alti da 400 anni a questa parte. Gli stessi indizi ci dicono che questi valori sono il risultato di un riscaldamento costante durato per un secolo a partire dall'emergere delle regioni artiche dalla Piccola età glaciale, un periodo freddo terminato intorno al 1850; il tocco finale è stato dato dalla drastica accelerazione del riscaldamento nell'ultima metà del secolo.

Le recenti tendenze della temperatura sono rispecchiate in molte altre serie temporali. Per esempio, di stagione in stagione i ghiacci fluviali e lacustri delle alte latitudini boreali si sono formati sempre più tardi, e sono andati in disgelo sempre più presto, a partire dalla Piccola età glaciale. La stagione di copertura glaciale è di 16 giorni più breve di quanto non fosse nel 1850. Nella zona dove è nato uno di noi (Sturm), in Alaska, ogni anno viene messo in palio un premio di circa 300.000 dollari destinato alla persona che indovini il momento esatto del disgelo primaverile del Tanana River. Mediamente, la data è arretrata di circa sei giorni da quando il premio fu istituito, nel 1917. I dati acquisiti grazie alla tecnologia – in particolare con le immagini da satellite – mostrano che la stagione libera da neve nella regione artica si è

UN CATALOGO DI CAMBIAMENTI

L'esame dell'insieme degli indicatori di riscaldamento dimostra, come nessuna misurazione da sola potrebbe fare, la profonda trasformazione oggi in corso in tutto l'Artico.

Lucy Reading (*illustrazione*); in senso orario, dall'alto a destra: Corbis; Scott T. Smith Corbis; Jacques Langevin Corbis Sygma; Glen Liston; Vladimir Romanovsky; Jim Brandenburg Minden Pictures; Galen Rowell Corbis

allungata di diversi giorni per decennio a partire dall'inizio degli anni settanta. Analogamente, anche la stagione delle coltivazioni si è allungata di quattro giorni.

Ghiacciai in ritiro, permafrost in disgelo

La mia prima ricerca sul cambiamento climatico nell'Artico non prevedeva nulla di complesso: si trattava di camminare attorno a un piccolo ghiacciaio sull'isola di Ellesmere, scavare fori nel ghiaccio, inserirvi lunghi pali di metallo, misurarne la parte che sporgeva all'esterno, tornare un anno dopo e vedere se i pali sporgessero di più.

Collocammo la maggior parte dei pali nella calda estate del 1982, e tornammo nel 1983, trovandoci in un mondo molto diverso: freddo, neve e nebbia persistevano settimana dopo settimana. Sembrava l'inizio di una nuova età glaciale. Il nostro piano prevedeva di ritornare ogni anno, ma come spesso accade i fondi vennero meno, e le mie esperienze artiche divennero pallide memorie.

Ma i ricordi talvolta si rinfrescano. Nel 2002 ricevetti una telefonata da uno studente molto agitato. Aveva visitato nuovamente il ghiacciaio, constatando come questo si stesse rapidamente sciogliendo. Il 1983 era stata un'anomalia. I miei pali erano ancora lì, diceva, però qualcuno era ormai steso in orizzontale sulla superficie del ghiaccio. Quanto in profondità li avevo inseriti? Avevo ancora i miei appunti di campagna? Le sue preoccupazioni erano infondate: avevo ancora il mio taccuino, impolverato ma al sicuro nella libreria. Ora sto ritornando sull'isola di Ellesmere, per vedere che cosa sia rimasto di quel ghiacciaio che, nel 1983, mi sembrava una caratteristica inalterabile del paesaggio. E invece – me ne rendo conto solo ora – potrebbe morire addirittura prima di me.

Mark Serreze

Anche i ghiacciai artici raccontano una storia impressionante. In Alaska, essi continuano a ritirarsi da mezzo secolo e, cosa ancora più preoccupante, la velocità di ritiro è triplicata negli ultimi 10 anni. La fusione dei ghiacciai si traduce in un innalzamento del livello marino di circa due millimetri per decennio. La determinazione dello stato dei ghiacci della Groenlandia, che sono molto più vasti e cambiano molto più lentamente, è stata una sorta di ricerca del Santo Graal per coloro che studiano l'Artico. Sia i risultati sul campo sia quelli ottenuti grazie ai satelliti indicano che la coltre glaciale manifesta un comportamento asimmetrico: il lato occidentale si assottiglia modestamente, mentre quello orientale rimane in equilibrio.

Le immagini da satellite più recenti indicano che il tasso di fusione sull'intera coltre è andato aumentando nel tempo. La superficie totale in fusione nelle stagioni estive è aumentata del sette per cento per ogni decennio dal 1978, e l'estate scorsa ha fatto segnare il record di tutti i tempi. A meno che le precipitazioni nevose invernali non compensino questo intenso scioglimento estivo, la coltre glaciale della Groenlandia è destinata a ritirarsi.

Il permafrost, vale a dire lo strato di suolo permanentemente gelato al di sotto della superficie, sta a sua volta subendo il disgelo. In uno studio pubblicato nel 1986, alcuni ricercatori dello US Geological Survey hanno attentamente misu-

rato i profili di temperatura rilevabili nei profondi fori di sonda per l'esplorazione petrolifera scavati attraverso il permafrost dell'Alaska settentrionale. Quando hanno estrapolato i profili alla superficie, hanno riscontrato una curva anomala, per la quale la migliore spiegazione ipotizzava un riscaldamento al livello del suolo, durante gli ultimi decenni, compreso tra 2 e 4 gradi. Risultati più recenti, sebbene ancora preliminari, fanno pensare che, a partire dal 1986, si sia verificato un ulteriore incremento di 2-3 gradi.

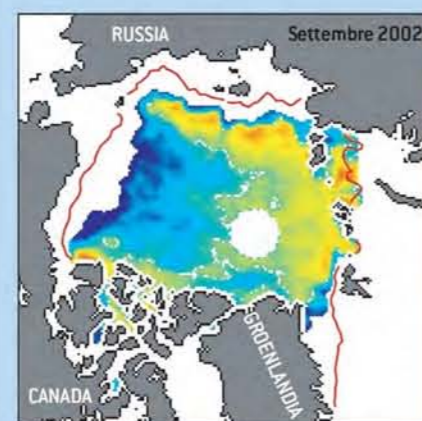
Dal momento che l'inverno artico dura nove mesi all'anno, la copertura nevosa controlla lo stato termico del suolo almeno quanto la temperatura dell'aria. Perciò queste registrazioni nei fori di sonda riflettono quasi certamente un cambiamento nella quantità e nella distribuzione temporale delle precipitazioni invernali, come pure un incremento della temperatura. Una quantità maggiore di neve significa un isolamento più spesso, e una migliore protezione del suolo dalle rigide temperature invernali. Il suolo che non si raffredda più di tanto in inverno è suscettibile di un maggiore riscaldamento in estate.

Indipendentemente dalle cause per cui si sta verificando, una cosa è certa: il disgelo del permafrost è un guaio. Questo fenomeno può infatti produrre cedimenti catastrofici di strade, case e altre infrastrutture. Ed è anche coinvolto in un altro cambiamento individuato di recente: nel corso degli ultimi 60 anni, l'efflusso di acqua dolce dei fiumi siberiani nel bacino artico è aumentato del sette per cento: una quantità equivalente a circa un quarto del volume del Lago Erie o a tre mesi di portata del Mississippi.

Gli scienziati attribuiscono questo cambiamento in parte a maggiori precipitazioni invernali e in parte a un riscaldamento del permafrost e dello strato attivo, che ritengono stia attualmente trasportando una maggiore quantità di acqua di falda. Questo afflusso di acqua dolce potrebbe avere importanti implicazioni per il clima globale: a quanto si può dedurre indirettamente dai dati paleontologici, quando l'acqua del bacino artico raggiunge una soglia critica di bassa salinità, la circolazione oceanica globale cambia drasticamente.

E, quando cambia la circolazione oceanica, si modifica anche il clima, dato che il sistema di circolazione – che consiste essenzialmente di un complesso di grandi «fiumi» che scorrono all'interno dell'oceano stesso, come per esempio la ben nota corrente del Golfo – è uno dei principali trasportatori di calore verso le regioni polari.

I FATTI: FREDDI, MA NON TROPPO

Gli scienziati che si arrovellano sulle alterazioni climatiche dell'Artico possono disporre di dati relativi a molti anni, provenienti da fonti diverse. Queste registrazioni rivelano che la tendenza al riscaldamento è molto maggiore di quella che ci si dovrebbe attendere se il clima stesse seguendo una progressione naturale dalla Piccola età glaciale a un regime di temperatura meno rigido. Ciò indica che, tra le cause, non può essere escluso il riscaldamento per effetto serra.

Un record di estensione minima dei ghiacci marini è stato misurato nel settembre 2002: la linea rossa mostra l'estensione media della coltre marina in questo periodo dell'anno. I colori indicano la deviazione (in percentuale) dalla norma storica. Per esempio, le aree in blu scuro a nord dell'Alaska hanno una concentrazione di ghiaccio inferiore del 30-40 per cento rispetto al valore medio per quel momento dell'anno. Fonte: Serreze e altri, 2002.

L'invasione della tundra da parte di cespugli (*bande scure*) nell'ultimo mezzo secolo è evidente in queste fotografie scattate presso il Chandlar River, in Alaska, nel 1949 e nel 2001.

Gits
Tanu-N
GROENLANDIA
NASA-U
Summit
Crawford Point
DYE-2
Fusione
Contorno di fusione del 2000
Stazione AWS

La fusione della coltre glaciale della Groenlandia ha segnato un record nell'estate del 2002. Il colore marrone mostra le aree in cui la coltre glaciale ha subito fusione durante l'estate. Il verde indica le aree libere dai ghiacci. Presso il sito Dye-2 la fusione estiva, normalmente confinata ai margini della coltre glaciale, si è estesa fino alla sommità.

Estate 1971–2000
Inverno 1971–2000
Temperature (gradi per decennio)

Il tasso di aumento delle temperature dell'aria artica è mostrato per le estati (*a sinistra*) e per gli inverni (*a destra*) tra il 1971 e il 2000. Toni verdi e blu indicano un raffreddamento; gialli e rossi, un riscaldamento. (Dati tratti da Chapman e Walsh, 1993, aggiornati al presente da Chapman.)

TOTALE ARTICO
Area (milioni di chilometri quadrati)
Anno

Dal 1978 si registrano impressionanti riduzioni dell'estensione della coltre glaciale marina artica.

Mark C. Serreze et al., 2003 (*cartina*); U.S. Navy (1949); Ken Tape (2001) Lucy Reading. Fonte: K. Steffan and R. Huff (*mappa*); Chapman e Walsh, 1993, aggiornate al presente da Chapman (*mappe delle temperature*); Lucy Reading. Fonte: National Snow e Ice Data Center, Boulder, Colorado (*grafico*)

Un Artico verde

Anche la vegetazione artica si sta spostando. In base a esperimenti di riscaldamento condotti in serra, i biologi sanno già da tempo che quando il clima si riscalda arbusti e cespugli crescono a spese di altre forme vegetali della tundra. Nelle stesse, favorevoli condizioni di crescita, il limite degli alberi migra verso nord. I ricercatori hanno tentato di verificare questi cambiamenti in natura, ma le risposte degli ecosistemi possono essere lente.

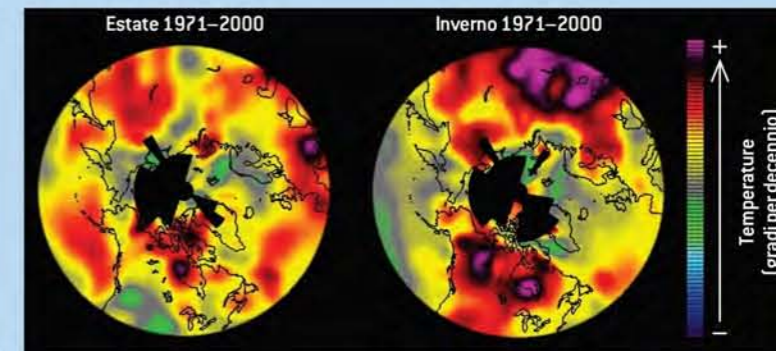
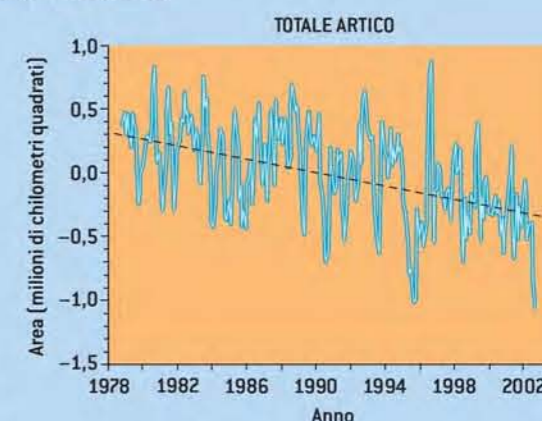
Solo negli ultimi anni, confrontando fotografie recenti con altre scattate 50 anni fa e utilizzando i satelliti per rilevare l'estensione crescente dell'area coperta da foresta, si è potuto documentare che si stanno verificando entrambi i tipi di trasformazione. Cambiando la vegetazione, muta inevitabilmente anche il ruolo dell'Artico nel ciclo globale del carbonio. Vasti depositi di carbonio sotto forma di torba giacciono al di sotto delle regioni di tundra di Alaska e Russia, a testimoniare che per lunghi periodi la tundra artica è stata un inghiottitoio di carbonio: attualmente sono congelati circa 2500 chilometri cubi di torba. In anni recenti, il riscaldamento ha prodotto un'alterazione: l'Artico sembra essere diventato una sorgente di biossido di carbonio. Il cambiamento è quasi impercettibile, ma preoccupante, dal momento che biossido di carbonio e metano sono i principali gas serra nell'atmosfera terrestre: intrappolano il calore, anziché lasciarlo disperdere nello spazio.

Gli inverni più miti sono responsabili di una parte di questa alterazione. Quando l'aria è più calda, le precipitazioni sono maggiori, in parte sotto forma di neve. Una neve più spessa è un isolante migliore, che trattiene calore nel suolo: come risultato, si ha un periodo più lungo durante il quale la tundra libera biossido di carbonio. Ma, a mano a mano che la tundra viene occupata da arbusti e cespugli, e che il suolo diviene più asciutto in estate per via delle temperature più elevate, l'equilibrio può oscillare in senso opposto, dato che le piante, e in particolare quelle legnose, fissano una maggiore quantità di carbonio e lo bloccano nell'ecosistema artico. Gli studi più recenti suggeriscono, di fatto, che l'entità e la direzione del bilancio del carbonio artico dipendano dall'arco di tempo che viene preso in esame, con una risposta che varia via via che le piante si adattano alle nuove condizioni.

La fusione dei ghiacci marini

«Questo ghiaccio marino è terribilmente sottile», pensai mentre mi aprivo un varco attraverso il ghiaccio per la seconda volta, un mattino di agosto del 1998. Non vi era pericolo reale, ora che i giubbotti galleggianti erano divenuti l'accessorio alla moda di rigore, ma quel ghiaccio dava preoccupazioni per altri motivi. Il mio viaggio fin lì, a quasi 1000 chilometri di distanza dal Polo Nord, era iniziato 10 mesi prima a bordo della rompighiaccio Des Groseillers, *che avevamo lasciato intenzionalmente bloccare nella banchisa per iniziare una deriva lunga un anno. La nostra missione era quella di studiare le retroazioni ghiaccio-albedo e nubi-irraggiamento. Quando iniziammo il viaggio, rimasi sorpreso di quanto fosse sottile il ghiaccio. Ora, dopo una stagione estiva di disgelo molto più lunga di quanto ci aspettassimo, era ancora più sottile, anche se eravamo andati costantemente alla deriva verso nord. Ero incerto su che cosa sarebbe venuto prima: la fine dell'estate o la fine del ghiaccio. Non sapevo che durante quell'estate era stato battuto il record di minima copertura glaciale per tutto l'Artico occidentale. Purtroppo per la sopravvivenza a lungo termine della banchisa, si trattava di un record che sarebbe stato stracciato nel 2002.*

Donald K. Perovich

Di tutti i cambiamenti che abbiamo catalogato, quello di gran lunga più allarmante è stato la riduzione della coltre glaciale marina artica. I ricercatori hanno seguito nel tempo questa alterazione, e hanno scoperto che l'area coperta dal ghiaccio è andata diminuendo circa del tre per cento per decennio dall'inizio delle registrazioni da satellite, nel 1972. Questo tasso sarebbe basso per un investimento finanziario, ma nel momento in cui il tempo viene misurato su una scala di secoli, o millenni, è altissimo. Con una coltre glaciale che copre un'area approssimativamente paragonabile, per dimensioni, a quella degli Stati Uniti, questa riduzione per decennio equivale a un'area pari a quella del Colorado e del New Hampshire messi insieme (che peraltro sono gli Stati dove abitano due di noi, Perovich e Serreze...). La variazione dello spessore del ghiaccio (misurata dai sottomarini) è anche più impressionante: una perdita del 40 per cento negli ultimi decenni. Alcuni modelli climatici indicano che entro il 2080 l'Oceano artico, in estate, sarà del tutto libero dai ghiacci.

Al contrario di quella dei ghiacciai terrestri, la fusione dei ghiacci marini non provoca un innalzamento del livello

UNA RETE COMPLESSA

La retroazione ghiaccio-albedo è la «nonna» di tutti i sistemi di retroazione. Essa funziona in questo modo: terra emersa, oceano e ghiaccio riflettono una parte della luce solare in arrivo, che di conseguenza sfugge nello spazio e non contribuisce al riscaldamento climatico. Questa frazione viene chiamata albedo. Una superficie con albedo pari a 1 riflette tutta la luce, mentre una superficie con albedo pari a 0 non ne riflette affatto. Sorprendentemente, l'Oceano artico presenta valori che coprono quasi l'intera gamma. Laddove è congelato e ricoperto di neve, ha l'albedo più alta di qualunque materiale si trovi in natura, circa 0,85, ma dove è libero dai ghiacci ha l'albedo più bassa, intorno allo 0,07.

Nella tarda primavera la banchisa glaciale è coperta di neve e risplende di biancore. La superficie riflette la maggior parte della luce solare incidente, anche se non tutta. Parte del ghiaccio fonde, facendo sì che il margine della coltre arretri rimpiazzando il ghiaccio coperto di neve, altamente riflettente, con la scura superficie oceanica, altamente assorbente. Inoltre, a distanza dall'oceano, la neve in via di fusione produce pozze d'acqua che pure hanno una bassa albedo. In queste aree la fusione delle superfici bianche fa diminuire l'albedo, il che conduce a una fusione ancora più accentuata, e così via.

I GHIACCI MARINI IN VIA DI FUSIONE, in una veduta panoramica. È evidente il contrasto tra le aree coperte da ghiaccio e neve, che riflettono il calore, e l'acqua, più scura, che lo assorbe. Le aree in turchese rappresentano pozze di fusione, vale a dire acqua dolce prodotta dallo scioglimento della neve alla superficie del ghiaccio; l'acqua dell'oceano appare, invece, quasi nera. Entrambi questi tipi di area assorbono molto più calore del bianco ghiaccio.

Donald K. Perovich

Se la retroazione ghiaccio-albedo funzionasse isolatamente, la previsione delle sue conseguenze sul clima globale sarebbe possibile anche ora. Ma non è così. Di fatto, sono in gioco retroazioni multiple – alcune positive, altre negative – e il loro effetto risultante è difficile da determinare. Per esempio, se l'albedo si riduce, l'effetto è quello di riscaldare il clima, ma allora l'atmosfera conterrà una quantità maggiore di vapore acqueo, e la copertura nuvolosa tenderà ad aumentare. Le nubi fungono da ombrello che riduce la quantità di luce solare che raggiunge la superficie (e ciò produce raffreddamento), ma d'altro canto intrappolano il reirraggiamento superficiale a onda lunga come se fossero una coperta (e ciò produce riscaldamento). In inverno l'effetto è chiaro: niente luce solare, niente ombrello, solo coperta. La retroazione dovuta alle nubi è positiva. Ma che cosa accade in estate, quando vi è abbondanza di luce solare? Gli studi sul campo hanno mostrato che la retroazione dipende dalla natura delle nubi: per le nubi alte e sottili composte primariamente di ghiaccio l'effetto ombrello domina e la retroazione nube-irraggiamento è negativa. Ma quando le nubi sono basse, di acqua liquida, del tipo di quelle che sono prevalenti in estate, domina l'effetto coperta e la retroazione è positiva. Di fatto, in presenza di queste nubi basse era facile constatare che si scioglieva più ghiaccio che nei giorni di sole.

I ricercatori stanno attualmente tentando di determinare quali retroazioni nella rete complessa che costituisce l'Artico siano più preoccupanti. Vale a dire, quali siano quelle che, come la retroazione ghiaccio-albedo, possono amplificare i cambiamenti già in corso, accelerandoli. Sono queste le retroazioni che potrebbero spingere il sistema oltre i limiti.

del mare, dato che il ghiaccio sta già galleggiando, ma è comunque un fenomeno allarmante per altre due ragioni. Localmente, la scomparsa del ghiaccio marino conduce alla perdita di un ecosistema marino unico, che comprende orsi polari, foche e balene in migrazione. Globalmente, un Artico sgombro dai ghiacci rappresenterebbe il capolinea della retroazione ghiaccio-albedo: verrebbe assorbita una quantità di gran lunga maggiore di radiazione solare, riscaldando non solo l'Artico, ma in definitiva ogni parte del globo.

Il ritiro della coltre glaciale marina non è sfuggito all'attenzione di uomini d'affari, turisti e politici. Sono in corso serie discussioni sulla fattibilità del passaggio via mare di navi mercantili dall'Asia all'Europa attraverso l'Oceano artico: il mitico «passaggio a nord-ovest». Nel 1906, quando l'Artico era ancora sotto l'influenza della Piccola età glaciale, Roald Amundsen, il formidabile esploratore polare norvegese, aveva impiegato più di tre anni per completare la prima traversata del passaggio. Molti esploratori prima di lui erano morti tentando lo stesso percorso. Negli ultimi anni, invece, più di 100 navi hanno completato la rotta con successo: alcune rompighiaccio russe erano addirittura attrezzate per lussuose crociere turistiche. Ora i turisti riescono ad arrivare in crociera fin quasi al Polo Nord. Tutto questo sarebbe stato inimmaginabile, anche con le rompighiaccio di oggi, nelle condizioni glaciali di 100 anni fa.

Il colpevole è l'effetto serra?

Questo inventario di sbalorditive trasformazioni nell'Artico solleva inevitabilmente una domanda: stiamo ancora uscendo dalla Piccola età glaciale o sta avvenendo qualcosa di diverso? Più specificamente: dovremmo forse interpretare questi cambiamenti come causati da un aumento della concentrazione di gas serra atmosferici tale da sconvolgere il ciclo naturale della temperatura, oppure queste modificazioni climatiche fanno parte di un ciclo naturale più lungo delle attese?

L'intricata rete di interazioni retroattive rende la questione oltremodo complicata: non abbiamo elementi a sufficienza per dare risposte non ambigue. Ma ne sappiamo comunque abbastanza per essere molto preoccupati.

Qualunque cosa sia la causa della fusione e del disgelo che stanno sconvolgendo l'Artico, queste modificazioni hanno dato inizio a una cascata di risposte su scala planetaria che continueranno anche se il riscaldamento dell'atmosfera dovesse improvvisamente e inaspettatamente arrestarsi. Si immagini il clima come un enorme masso di forma sferica su un terreno accidentato. È come se questo masso fosse stato spinto un pochino – forse da un ciclo climatico naturale, o forse dall'attività umana – e avesse iniziato a rotolare. Anche se la spinta venisse meno, il masso continuerebbe comunque a rotolare. Quando il rotolamento avrà fine, la posizione di equilibrio del masso sarà completamente diversa da quella precedente.

Per affrontare la costellazione di cambiamenti dell'Artico in maniera concertata e per sviluppare una reale capacità di prevedere ciò che accadrà, anziché limitarsi a reagire agli eventi, oltre una decina di enti federali statunitensi ha iniziato a coordinare la propria ricerca sull'Artico nell'ambito di un programma chiamato SEARCH (Study of Environmental Arctic Change). I primi risultati sembrano promettere qualche successo nel portare in luce collegamenti tra i sistemi strettamente accoppiati che danno origine al clima dell'Artico, influenzando quello di tutto il pianeta. Una recente scoperta sull'andamento della circolazione dei venti, per esempio, aiuta a spiegare alcuni andamenti spaziali dell'aumento delle temperature che finora risultavano assolutamente enigmatici (*si veda la finestra qui sopra*). Fatto altrettanto importante, le registrazioni di alta qualità del cambiamento climatico ora permettono di risalire all'indietro di 30-50 anni.

In tempi brevi, queste registrazioni e altre nuove scoperte dovrebbero consentirci di determinare se la trasformazione dell'Artico rappresenti una tendenza naturale legata all'uscita dalla Piccola età glaciale o qualcosa di più complesso. La sfida più difficile consisterà nell'arrivare a comprendere in che modo interagiscano i diversi meccanismi operanti nel sistema artico: e, possibilmente, nell'arrivarci in fretta.

VENTI DI CAMBIAMENTO

Anche all'epoca dei Vichinghi, si sapeva che quando gli inverni in Europa settentrionale erano miti, tendevano a essere rigidi in Groenlandia meridionale, e quando invece erano miti in Groenlandia si prospettavano rigidi in Europa. Oggi sappiamo che questa fluttuazione di temperatura è reale, e non condiziona solo Groenlandia ed Europa. L'oscillazione è legata a un andamento di circolazione atmosferica conosciuto come Oscillazione nord-atlantica (NAO). La NAO descrive la variazione correlata di una grande area di bassa pressione centrata in prossimità dell'Islanda (il ciclone dell'Islanda) con una grande area di alta pressione centrata in prossimità delle Azzorre (l'anticiclone delle Azzorre). Quando queste due aree di pressione sono marcate, la NAO è in fase positiva. Quando entrambe sono deboli, è in fase negativa. La NAO può essere legata a un andamento di variabilità atmosferica ancora più ampio, l'Oscillazione artica (AO).

Una caratteristica chiave della NAO è che i venti spirano in senso antiorario attorno al ciclone dell'Islanda, mentre spirano in senso orario attorno all'anticiclone delle Azzorre. Quando la NAO è in fase positiva, i venti attorno al minimo di pressione dell'Islanda sono più intensi del normale, e aria calda proveniente da sud scorre sull'Europa del Nord e gran parte dell'Eurasia settentrionale. Nel contempo, lo stesso modello di circolazione spazza con aria fredda le parti artiche della Groenlandia, il Nord Atlantico e la parte nordorientale del Nord America. Quando la NAO è in fase negativa, questa situazione si indebolisce (e talvolta può perfino invertirsi) e ciò conduce a una distribuzione di temperature più o meno speculare. Dal 1970 circa, la NAO invernale è stata per lo più «bloccata» in fase positiva, il che aiuta a spiegare come mai durante questo periodo si sia osservata un'ampia zona di riscaldamento sull'Alaska, il Canada orientale e la Groenlandia meridionale. I venti caldi e umidi che soffiano sull'Eurasia settentrionale hanno provocato un incremento delle precipitazioni, mentre gli andamenti alterati di circolazione del vento sull'Oceano Artico hanno contribuito a rompere la coltre glaciale marina, comportando la riduzione dei ghiacci marini osservata nel corso degli ultimi 30 anni.

Lucy Reading

GLI AUTORI

MATTHEW STURM, DONALD K. PEROVICH e MARK C. SERREZE hanno dedicato gran parte dei loro studi alla comprensione del clima dell'Artico. In 16 anni trascorsi allo US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, in Alaska, Sturm ha diretto oltre una decina di spedizioni invernali nell'Alaska artica. Perovich lavora presso la sede del New Hampshire dello US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Il suo lavoro di ricerca si focalizza sui ghiacci marini e sul meccanismo di retroazione ghiaccio-albedo. Serreze lavora dal 1986 presso il National Snow and Ice Data Center dell'Università del Colorado a Boulder, studiando il cambiamenti climatici artici e le interazioni tra i ghiacci marini e l'atmosfera.

BIBLIOGRAFIA

PEROVICH D. K. e altri, *Year on Ice Gives Climate Insights*, in «EOS, Transactions of the American Geophysical Union», 80, n. 481, pp. 485-486, 1999.

SHAVER G. R. e altri, *Global Warming and Terrestrial Ecosystems: A Conceptual Framework for Analysis*, in «BioScience», 50, n. 10, 2000.

SERREZE M. C. e altri, *Observational Evidence of Recent Change in the Northern High-Latitude Environment*, in «Climatic Change», 46, pp. 159-207, 2000.

The Surface Heat Budget of the Arctic Ocean (SHEBA), sezione speciale, in «Journal of Geophysical Research - Oceans», 107, n. 15, ottobre 2002.

Siti Web:

http://psc.apl.washington.edu/search/

http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/sciencepub/front.htm

Muscoli artificiali

di Steven Ashley
giornalista e redattore di «Scientific American»

Nuovi dispositivi per la generazione di movimento – attuatori, motori, generatori – basati su polimeri che cambiano forma quando vengono stimolati elettricamente sono ormai prossimi alla commercializzazione

È solo un giocattolo da 100 dollari: un acquario contenente pesci robotici che nuotano allegramente. Ciò che rende notevole questo prodotto della Eamex Corporation di Osaka, in Giappone, è che i pesci di plastica dai colori sgargianti che fendono l'acqua imitando fedelmente i modelli viventi non contengono parti meccaniche: non hanno motori, alberi di trasmissione o ingranaggi, e neppure una batteria. Questi pesci nuotano perché le loro viscere di materiale plastico si flettono avanti e indietro come se lo facessero di propria volontà. Si tratta di uno dei primi prodotti commerciali basati su una nuova generazione di polimeri elettroattivi migliorati (EAP, *ElectroActive Polymers*), materiali plastici che si muovono in risposta all'elettricità. Da decenni gli ingegneri che costruiscono attuatori, ossia dispositivi per la generazione di movimento, stanno cercando un equivalente artificiale del muscolo. Questi organi possono produrre quantità controllate di forza sufficienti, a seconda dei casi, a battere una palpebra o a sollevare un bilanciere da palestra, e questo semplicemente variando la propria lunghezza in risposta agli stimoli nervosi. I muscoli mostrano anche la proprietà dell'invarianza di scala: il loro meccanismo funziona in modo ugualmente efficiente a tutte le dimensioni, e per questa ragione lo stesso tipo di tessuto serve sia per il movimento degli insetti sia per quello degli elefanti. Qualcosa di simile al muscolo potrebbe dunque essere molto utile in tutte le situazioni in cui sia difficile ricorrere a minuscoli motori elettrici. Gli EAP promettono di diventare i muscoli artificiali del futuro e i ricercatori, senza nascondere le loro ambizioni, stanno lavorando a molte tecnologie attuali su possibili alternative EAP. E non temono di mettere a confronto le loro creazioni con quelle della natura: pochi anni fa alcuni di loro, tra cui Yoseph Bar-Cohen, ricercatore presso il Jet Propulsion Laboratory di Pasadena, in California, hanno lanciato una sfida al mondo della ricerca, per incentivare l'interesse sui polimeri elettroattivi. L'idea era di premiare il primo braccio robotico azionato da EAP che fosse in grado di

UN BRACCIO ROBOTICO azionato da polimeri elettroattivi potrebbe diventare competitivo contro un essere umano in una sfida a braccio di ferro.

Jamie Kripke

COME L'ELETTRICITÀ FA ESPANDERE UN MATERIALE PLASTICO

Il meccanismo fondamentale alla base dei muscoli artificiali è relativamente semplice. Quando vengono esposti a campi elettrici ad alta tensione, gli elastomeri dielettrici – come i siliconi e gli acrilici – si contraggono nella direzione delle linee del campo elettrico e si espandono perpendicolarmente a esse, secondo un fenomeno che i fisici chiamano stress di Maxwell. I nuovi dispositivi sono sostanzialmente condensatori «gommosi»: due piastre parallele elettricamente cariche che racchiudono a sandwich un materiale dielettrico. Quando si eroga energia, cariche positive e negative si accumulano sugli elettrodi opposti. Esse si attraggono reciprocamente provocando la compressione dell'isolante polimerico, che risponde espandendosi in superficie.

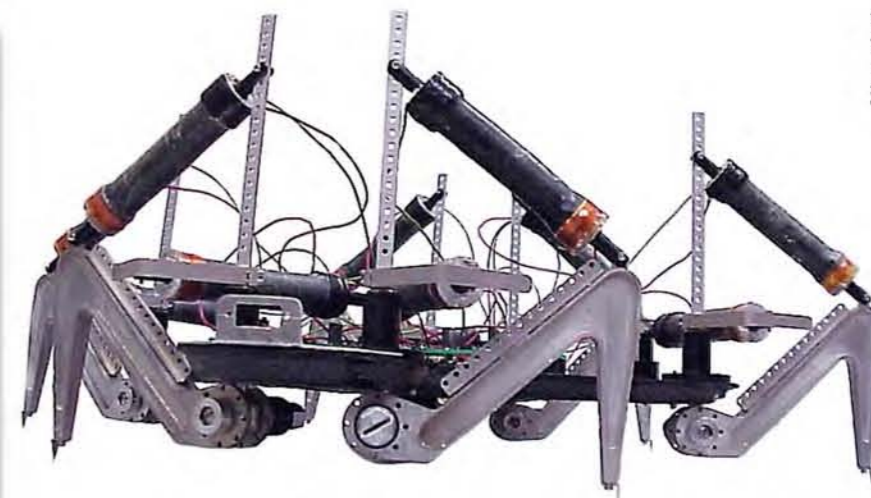
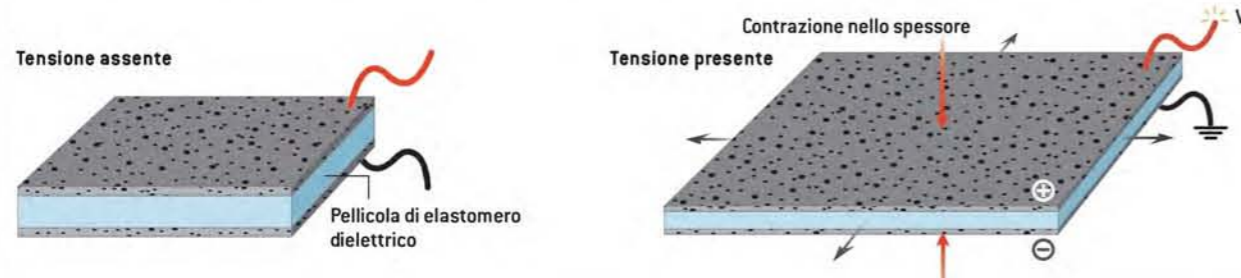
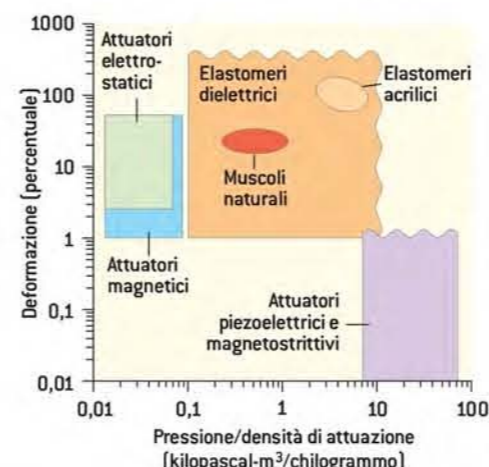
È possibile far aderire per laminazione pellicole sottili di elastomeri dielettrici (tipicamente di spessore compreso tra 30 e 60 micrometri) a particelle di carbonio conduttrici sospese in una matrice polimerica morbida. Quando sono connessi da cavi a una sorgente di elettricità, gli strati di carbonio fungono da elettrodi flessibili che si espandono in superficie di pari passo con il materiale compreso tra essi. Questo strato sottile di materiale plastico funge da base per un'ampia gamma di dispositivi di attuazione, di sensori e di generatori di energia.

Gli elastomeri dielettrici, che possono crescere fino al 400 per cento rispetto alle loro dimensioni nello stato non attivato, non sono i soli tipi di materiali elettroattivi, ma ne rappresentano alcuni degli esempi più efficienti.

Il grafico sulla destra confronta le prestazioni di varie classi di materiali e dispositivi di attuazione. Queste comprendono prodotti ben consolidati per la generazione di movimento, azionati da correnti elettriche, ma anche da campi elettrostatici o elettromagnetici. La deformazione è data dall'entità dello spostamento (o corsa) per unità di lunghezza che i dispositivi possono generare. La pressione/densità di attuazione è una misura della forza prodotta. Gli elastomeri dielettrici possono generare più deformazione e forza rispetto a molte altre tecnologie concorrenti. Le loro proprietà a questo riguardo sono simili a quelle del tessuto muscolare animale, e da qui viene il termine «muscoli artificiali».

Tensione assente
Pellicola di elastomero dielettrico

Sara Chen

SRI International

UN ROBOT SIMILE A UN INSETTO (chiamato Flex) cammina su zampe azionate dall'estensione di muscoli artificiali del tipo rullo a molla.

IN SINTESI

- Fisici e chimici cercano da molto tempo di sviluppare materiali leggeri che si dilatino o si contraggano in modo significativo in lunghezza o volume quando vengono sottoposti a stimolazione elettrica. Tali sostanze potrebbero servire per azionare nuovi dispositivi per la generazione di movimento (generalmente chiamati attuatori) come possibili sostituti dei motori elettrici, che spesso sono troppo grandi e pesanti per applicazioni di piccola scala.
- Una nuova generazione di materiali polimerici elettroattivi presenta una risposta fisica all'eccitazione elettrica sufficiente per azionare nuove classi di attuatori, come pure sensori e generatori di energia innovativi. I prodotti basati su questa tecnologia del «muscolo artificiale» sono in procinto di entrare sul mercato.

sconfiggere in gara un campione di braccio di ferro. Avuta l'idea, iniziarono anche a cercare sponsor disposti a finanziare un premio in denaro per il vincitore.

Forse il più promettente dei tentativi di ottenere EAP efficienti è quello in corso presso la SRI International, un centro di ricerca no profit con sede a Menlo Park, in California. Entro pochi mesi, i responsabili della SRI sperano di completare la raccolta dei 4-6 milioni di dollari di investimenti necessari a lanciare una società *spin-off*, chiamata provvisoriamente Artificial Muscle Incorporated, per commercializzare la tecnologia EAP da loro brevettata. Già ora la SRI sta lavorando su una mezza dozzina di contratti di ricerca e sviluppo con il Governo statunitense e con produttori di giocattoli, automobili, elettronica, medicali, nonché con l'industria calzaturiera, per portare i muscoli artificiali sul mercato.

Qual è l'obiettivo iniziale di questa società? «Solo» quello di sostituire un numero sostanziale della miriade di motori elettrici che usiamo regolarmente – per non parlare dei molti altri meccanismi di uso comune per la generazione di movimento – con prodotti più piccoli, leggeri e a buon mercato che facciano uso dei nuovi attuatori. «Riteniamo che questa tecnologia abbia buone possibilità di rivoluzionare il campo dell'attuazione meccanica» afferma Phillip von Guggenberg, direttore dello sviluppo commerciale della SRI. «Ci piacerebbe rendere questa tecnologia ubiquitaria, il tipo di roba che si può trovare nei negozi di ferramenta.»

Materiali che si muovono

Bar-Cohen è il coordinatore non ufficiale della variegata comunità internazionale dei ricercatori sugli EAP fin dalla metà degli anni novanta. Tornando alla prima infanzia di questo campo di ricerca, «i materiali polimerici elettroattivi di cui leggevo negli articoli scientifici non funzionavano come reclamizzato» rammenta ridacchiando sornione. «E dato che io avevo già ottenuto finanziamenti dalla NASA per studiare questa tecnologia, mi trovavo costretto a guardarmi intorno per individuare chi stesse lavorando in quest'area e potesse mostrarmi qualcosa di realmente funzionante.» Nel giro di pochi anni, Bar-Cohen aveva imparato abbastanza da poter contribuire alla preparazione della prima conferenza scientifica sull'argomento, iniziare a pubblicare un notiziario, allestire un sito Web sugli EAP e curare due libri su questa tecnologia nascente.

Sedendo tra schiere di tavoli da laboratorio disseminati di prototipi di attuatori e apparecchi di prova in un edificio nel campus del JPL, Bar-Cohen ripercorre la storia del campo di ricerca che ha imparato a conoscere così bene. «Per molto tempo – esordisce – si è lavorato sui possibili modi di spostare gli oggetti senza ricorrere a motori elettrici, che per molte applicazioni sono troppo pesanti e voluminosi. Fino allo sviluppo degli EAP, la tecnologia standard di sostituzione era quella delle ceramiche piezoelettriche, che sono state in auge per qualche tempo.»

Nei materiali piezoelettrici, lo stress meccanico fa sì che i cristalli si polarizzino elettricamente, e viceversa. Sottoponendoli a una corrente elettrica, si deformano; deformandosi, generano elettricità.

Bar-Cohen solleva un piccolo disco grigiastro dai banchi di laboratorio, dicendo: «Questo è fatto di PZT, titanato-zirconato di piombo». Spiega come la corrente elettrica faccia sì che il PZT piezoelettrico si contragga e si espanda per meno dell'1 per cento della sua lunghezza totale. Non è molto, ma è già qualcosa.

Nella stanza accanto, Bar-Cohen mostra trapani a percussione azionati da dischi in PZT che sta costruendo con i suoi colleghi del JPL e con la Cybersonics. «All'interno di questo cilindro c'è una pila di dischi piezoelettrici» spiega. «Quando è attivata con corrente alternata, la pila batte ultrasonicamente su una massa che salta su e giù ad alta frequenza, facendo avanzare uno scalpello nella roccia solida.» Di lato si vedono pile di blocchi di pietra nei quali gli scalpelli di perforazione hanno scavato fori profondi.

Come dimostrazione dell'efficacia con cui le piezoceramiche possono fungere da attuatori, è abbastanza impressionante. Ma molte applicazioni richiederebbero materiali elettroattivi in grado di espandersi e contrarsi in misura percentualmente più significativa.

Plastiche che reagiscono

I polimeri che cambiano forma in risposta all'elettricità, secondo Bar-Cohen, possono essere classificati in due gruppi: quelli di tipo ionico e quelli di tipo elettronico, ciascuno con vantaggi e svantaggi complementari.

Gli EAP ionici (che comprendono gel polimerici ionici, compositi polimero-metallo ionomerici, polimeri conduttori e nanotubi di carbonio) funzionano con meccanismi elettrochimici, ovvero in base alla mobilità o alla diffusione di particelle elettricamente cariche, gli ioni. Essi possono funzionare anche in assenza di batterie, poiché anche differenze di potenziale minime li fanno flettere in misura significativa. Il problema è che, generalmente, hanno bisogno di rimanere umidi, e per questo devono essere sigillati con rivestimenti flessibili. L'altro principale inconveniente di molti EAP ionici (specialmente i compositi polimero-metallo ionomerici) è che, fino a quando vi è elettricità, il materiale continua a muoversi. E se la tensione supera un certo livello si verifica elettrolisi, che causa un danno irreversibile al materiale.

Invece gli EAP elettronici (come i polimeri ferroelettrici, gli elettreti, gli elastomeri dielettrici e gli elastomeri a innesto elettrostrittivo) sono azionati da campi elettrici. Questi materiali richiedono tensioni relativamente alte, che possono causare spiacevoli scosse elettriche. Ma, in cambio, gli EAP elettronici sono in grado di reagire rapidamente e di sviluppare intense forze meccaniche. Non richiedono rivestimento protettivo e mantengono la posizione anche in assenza di corrente. Il materiale per muscolo artificiale della SRI ricade nella categoria degli EAP elettronici. La strada lunga e accidentata che ha condotto al suo sviluppo è un compendio delle bizzarrie che costellano le vie dell'innovazione tecnologica.

Elettrificare la gomma

«La SRI International iniziò a lavorare sui muscoli artificiali nel 1992, con un contratto che si inseriva nel programma giapponese sulle micromacchine» racconta Ron Pelrine, il fisico convertito all'ingegneria meccanica che dirige il gruppo dell'SRI. I giapponesi stavano cercando un nuovo tipo di tecnologia per microattuatori. Alcuni ricercatori dell'SRI iniziarono a cercare un materiale in grado di generare movimento che assomigliasse al muscolo naturale in termini di forza, corsa (spostamento lineare) e deformazione (spostamento per unità di lunghezza o di superficie).

«Prendemmo in esame un mucchio di possibili tecnologie di attuazione – ricorda Pelrine – ma alla fine la scelta cadde sui polimeri elettrostrittivi, una classe di

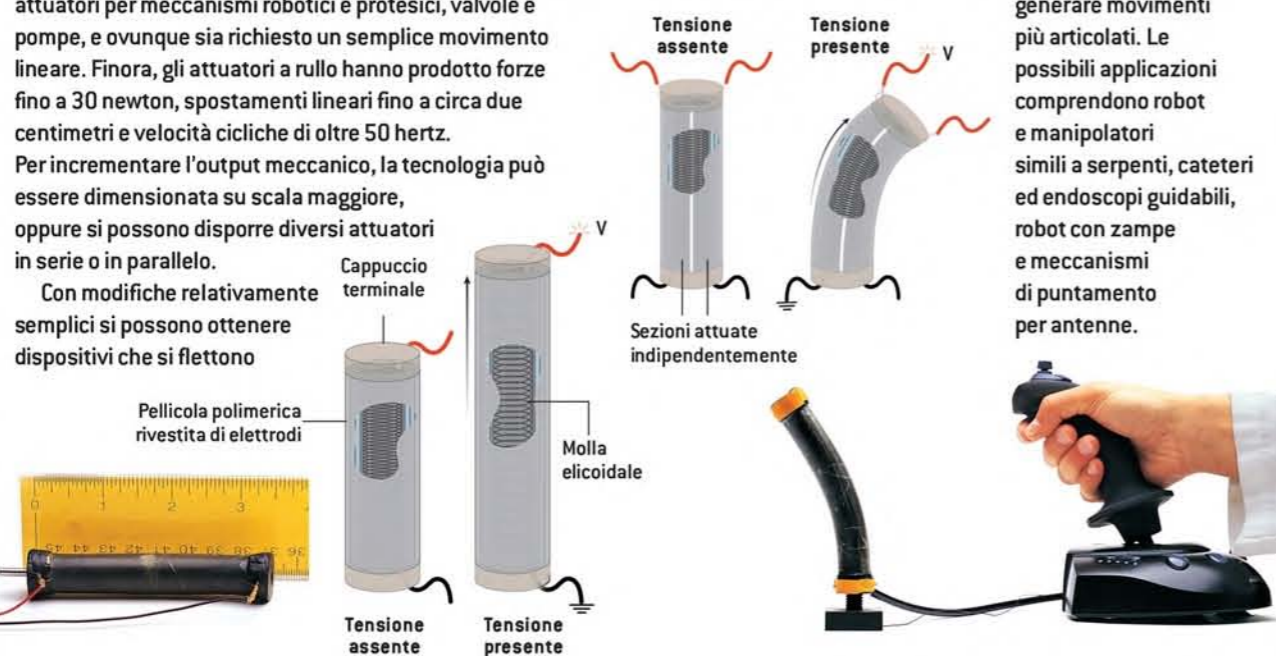
RULLI A MOLLA, SERPENTI E BRACCI ROBOTICI

I polimeri che si espandono in risposta all'elettricità consentono di costruire attuatori a cilindro che si estendono o si flettono a comando. Dapprima due strati di elastomeri dielettrici (laminati su entrambi i lati con elettrodi flessibili) sono arrotolati in cilindri compatti. Spesso i materiali elastomerici vengono avvolti attorno a una molla elicoidale compressa che conferisce un intenso pretensionamento alla pellicola, esaltando così le prestazioni del dispositivo. Questi «rulli a molla» possono servire per molte applicazioni, come attuatori per meccanismi robotici e protesici, valvole e pompe, e ovunque sia richiesto un semplice movimento lineare. Finora, gli attuatori a rullo hanno prodotto forze fino a 30 newton, spostamenti lineari fino a circa due centimetri e velocità cicliche di oltre 50 hertz. Per incrementare l'output meccanico, la tecnologia può essere dimensionata su scala maggiore, oppure si possono disporre diversi attuatori in serie o in parallelo.

Con modifiche relativamente semplici si possono ottenere dispositivi che si flettono a comando. È infatti possibile «spruzzare» sulla pellicola di elastomero dielettrico degli elettrodi speciali, in modo che il rullo incorpori due attuatori alimentati indipendentemente su ciascun lato. Se solo la metà sinistra riceve corrente, la metà destra inibisce il movimento risultante facendo sì che il dispositivo si fletta verso destra (*qui sotto*). Se viene attivata solo la metà destra, il rullo si flette verso sinistra. Se entrambe le metà vengono alimentate, il rullo si estende.

Schiere più complesse di elettrodi indipendenti possono generare movimenti più articolati. Le possibili applicazioni comprendono robot e manipolatori simili a serpenti, cateteri ed endoscopi guidabili, robot con zampe e meccanismi di puntamento per antenne.

Cappuccio terminale
Pellicola polimerica rivestita di elettrodi
Molla elicoidale
Tensione assente
Tensione presente
V
Sezioni attuate indipendentemente

Sara Chen (illustrazioni), Jamie Kripke (fotografia)

materiali che veniva studiata da Jerry Scheinbeim, della Rutgers University.» In quei polimeri le molecole di idrocarburi sono disposte in schiere semicristalline che presentano proprietà piezoelettriche.

Quando vengono esposti a un campo elettrico, tutti i materiali plastici isolanti, come il poliuretano, si contraggono nella direzione delle linee del campo e si espandono perpendicolarmente a esse. Questo fenomeno, diverso dall'elettrostrizione, è chiamato stress di Maxwell. «Pur essendo noto da molto tempo, era generalmente considerato una seccatura» dice Pelrine.

Egli si rese conto che, per l'attrazione elettrostatica, polimeri più morbidi del poliuretano si sarebbero schiacciati maggiormente, e quindi avrebbero offerto sollecitazioni meccaniche maggiori. Lavorando con siliconi morbidi, gli scienziati della SRI dimostrarono di poter ottenere deformazioni del tutto accettabili del 10-15 per cento. Valori che, con il progredire della ricerca, sono arrivati fino al 20-30 per cento. Per distinguere i nuovi materiali per attuatori, i siliconi e gli altri materiali plastici morbidi furono battezzati «elastomeri dielettrici» (ma sono anche chiamati polimeri attuati da campo elettrico).

Dopo aver identificato molti materiali polimerici promettenti, per il resto degli anni novanta il gruppo ha focalizzato la propria attenzione sugli aspetti ingegneristici di dispositivi per specifiche applicazioni. Gran parte del nuovo supporto finanziario al gruppo della SRI venne all'epoca dalla Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) e dall'Office for Naval Research, i cui direttori erano interessati all'uso della tecnologia soprattutto a fini militari, per esempio in piccoli robot da ricognizione e in generatori elettrici leggeri.

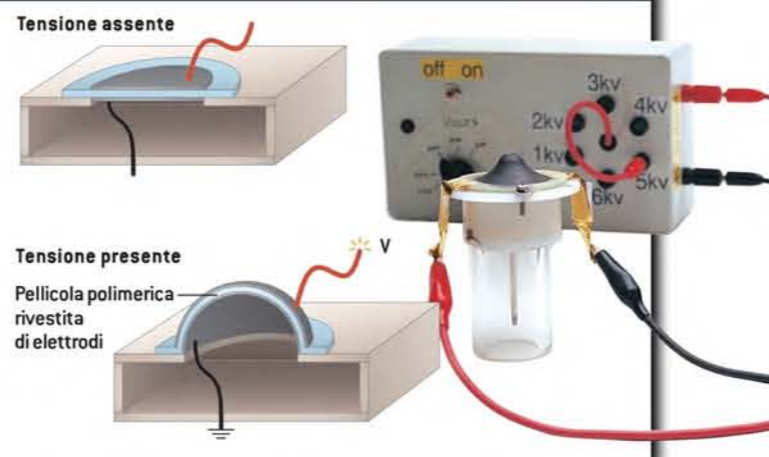
Quando gli elastomeri iniziarono a mostrare deformazioni molto più cospicue, gli ingegneri si resero conto che anche gli elettrodi avrebbero dovuto diventare in grado di espandersi. Gli elettrodi metallici ordinari non possono deformarsi senza rompersi. «In precedenza, non bisognava preoccuparsi di questo problema, poiché i materiali su cui si lavorava presentavano deformazioni dell'ordine dell'1 per cento» nota Pelrine. Alla fine, il gruppo realizzò elettrodi deformabili basati su particelle di carbonio in matrice elastomerica. «Dato che gli elettrodi si espandono di pari passo con la plastica – sottolinea Pelrine – possono mantenere il campo elettrico compreso tra essi per tutta la regione attiva.» La SRI International ha brevettato l'idea, una delle chiavi d'accesso alla successiva tecnologia del muscolo artificiale.

Ansioso di darci una dimostrazione, Pelrine afferra un oggetto che sembra una cornice quadrata attraverso la quale è tesa una pellicola di plastica. «Questo materiale polimerico è molto deformabile» dice premendo con un dito la pellicola trasparente. «In realtà è un nastro biadesivo che viene venduto a basso costo in grandi rotoli.» Su entrambi i lati, al centro del foglietto, si vedono elettrodi deformabili neri, grandi come monetine, collegati a fili elettrici.

Pelrine gira una manopola di controllo per l'erogazione di energia elettrica. Istantaneamente, il cerchio scuro degli

MEMBRANE IN ESPANSIONE

Gli attuatori a diaframma sono costituiti da pellicole di elastomeri dielettrici collocate su un'apertura di un telaio rigido. Grazie alla spinta esercitata da una molla, da una sovrapressione d'aria, da schiuma o altro, quando viene applicata la differenza di potenziale il diaframma, invece di corrugarsi, si muove verso l'alto o verso il basso.
Gli attuatori a diaframma sono assai adatti alla costruzione di pompe o di altoparlanti. Tecnologie alternative, come quelle basate su materiali piezoelettrici, sono in uso da molto tempo, ma i diaframmi a elastomeri dielettrici permettono spostamenti più ampi. In alcuni dispositivi si può ottenere una deflessione da una posizione iniziale piatta a una forma convessa.

Sara Chen [illustrazioni]; Jamie Kripke [fotografia]

elettrodi accoppiati aumenta di un quarto il proprio diametro. Quando riporta la manopola nella posizione iniziale, il disco torna subito a restringersi. Pelrine ammicca con un sorriso e ripete la sequenza alcune volte, spiegando: «Fondamentalmente, i nostri dispositivi sono condensatori: due piastre parallele elettricamente cariche separate da un materiale dielettrico. Quando applichiamo una differenza di potenziale, cariche positive e negative si accumulano sugli elettrodi opposti. Esse si attraggono reciprocamente e comprimono lo strato polimerico isolante, che risponde espandendosi in superficie».

Anche se sono stati identificati molti materiali promettenti, si è rivelato assai difficile ottenere prestazioni accettabili in dispositivi di interesse pratico. Un paio di progressi significativi, nel 1999, hanno riscosso comunque un notevole interesse da parte del Governo e dell'industria. Uno di essi è nato dall'osservazione del fatto che deformando i polimeri prima di attivarli elettricamente se ne potevano incrementare enormemente le prestazioni. «Nessuno sapeva esattamente perché – ricorda Roy Kornbluh, un altro membro del gruppo – ma il pretensionamento dei polimeri incrementava la resistenza alla scarica disruttiva [cioè la resistenza al passaggio della corrente tra elettrodi] fino a 100 volte.» Le deformazioni di attuazione miglioravano in misura parallela. Per quanto la ragione sia ancora poco chiara, il chimico della SRI Qibing Pei ritiene che «il pretensionamento orienti le catene molecolari lungo il piano di espansione e renda quest'ultimo più rigido in quella direzione». Per ottenere il pretensionamento, i dispositivi di attuazione della SRI includono una struttura esterna di rinforzo.

La seconda scoperta di importanza cruciale si ebbe in primo luogo poiché i ricercatori «stavano mettendo alla prova qualunque materiale deformabile capitasse loro a tiro, secondo un approccio che si potrebbe definire edisoniano» dice Pelrine con aria divertita. (Thomas Edison aveva provato sistematicamente ogni sorta di materiale per i filamenti delle sue lampadine.) «A casa mia, avevamo chiuso il frigorifero con un bloccaporta in materiale polimerico per impedire a nostro figlio di aprirlo. Una volta cresciuto il bimbo, il bloccaporta era diventato superfluo, e decisi di rimuoverlo. Dato che era fatto di materiale deformabile, misi alla prova le sue caratteristiche di deformazione, e sorprendentemente constatai che erano ottime.» Gli sforzi per risalire alla composizione di quel materiale non furono da poco, ma alla fine il polimero del mistero si rivelò essere un elastomero acrilico che poteva produrre deformazioni colossali – fino al 380 per cento di deformazione lineare – con output di energia in proporzione. Questi due sviluppi consentirono ai ricercatori di iniziare ad applicare gli elastomeri dielettrici ai dispositivi di attuazione del mondo reale.

Dalla teoria alla pratica

La strategia generale del gruppo della SRI è flessibile, in quanto prende in considerazione molti progetti e anche polimeri differenti. Come dice Pei, «questo è un dispositivo, non un materiale». Secondo Pelrine, il team è in grado di produrre l'effetto di attuazione con polimeri di varia natura, compresi acrilici e siliconi. Anche la gomma naturale funziona, in qualche misura. Alle temperature estreme dello spazio esterno, per esempio, i muscoli artificiali potrebbero essere fatti di materiali plastici siliconici che hanno dimostrato di poter funzionare in condizioni di vuoto a 100 gradi sotto zero. Per usi che richiedano forze di output molto intense si potrebbero impiegare più polimeri o collocare più dispositivi in serie o in parallelo.

«Dal momento che gli elastomeri dielettrici sono prodotti comunemente in vendita, e che per ciascun dispositivo usiamo superfici di materiale relativamente ridotte, gli attuatori avrebbero costi molto bassi, particolarmente per grandi produzioni» valuta von Guggenberg.

Le tensioni richieste per attivare gli attuatori a elastomeri dielettrici sono relativamente alte – tipicamente da uno a cinque chilovolt – cosicché questi dispositivi possono funzionare a corrente molto bassa (in generale, un'alta tensione significa una bassa corrente). Essi impiegano inoltre cavi sottili e poco costosi, e date le basse correnti non sono soggetti a riscaldamento. «Fino a che il campo elettrico non cede e la corrente elettrica fluisce tra gli elettrodi, una differenza di potenziale maggiore consente di produrre un'espansione maggiore, e quindi una maggiore forza» dice Pelrine.

«L'alta tensione può preoccupare – commenta Kornbluh – ma non è necessariamente pericolosa. Dopo tutto, le lampade a fluorescenza e i tubi a raggi catodici sono dispositivi ad alta tensione, ma nessuno si preoccupa per questo. Il problema esiste più che altro per i dispositivi mobili, dato che le batterie sono di solito a bassa tensione e quindi si rendono necessari circuiti elettrici aggiuntivi di trasformazione.» Tuttavia, presso la Pennsylvania State University, Qiming Zhang e il suo gruppo di ricerca sono riusciti ad abbassare la tensione di attivazione di certi polimeri elettrostrittivi combinandoli con altre sostanze per creare compositi.

Quando gli si chiede quanto siano destinati a durare gli attuatori elastomerici dielettrici della SRI, Guggenberg ammette che a questo proposito sono necessari ulteriori studi, ma afferma di avere «ragionevoli indicazioni» del fatto che possano durare sufficientemente a lungo per un uso commerciale: «Per esempio, per un

cliente abbiamo prodotto un dispositivo che produce deformazioni moderate, dal 5 al 10 per cento, per 10 milioni di cicli». Un altro dispositivo ha generato deformazioni di superficie (ossia non lineari) del 50 per cento per un milione di cicli.

Per quanto i dispositivi a muscolo artificiale possano pesare significativamente meno di motori elettrici di potenza confrontabile – i polimeri hanno la densità dell'acqua – sono in corso tentativi di ridurne ulteriormente la massa, agendo sulle strutture esterne necessarie per tenere i polimeri in pretensionamento. Pei, per esempio, sta sperimentando un procedimento chimico per eliminare del tutto le intelaiature, relativamente pesanti.

I prossimi prodotti

Avendo sviluppato un meccanismo di base, il gruppo della SRI ha iniziato ben presto a lavorare su una serie di concetti applicativi.

Attuatori lineari. Per produrre ciò che chiamano rulli a molla, gli ingegneri avvolgono numerosi strati di fogli elastomerici dielettrici laminati pretensionati attorno a una molla elicoidale. La molla di tensione mantiene il pretensionamento lungo la circonferenza, mentre il pretensionamento in lunghezza della pellicola mantiene la molla compressa (*si veda l'illustrazione a pagina 70*). La differenza di potenziale applicata fa sì che la pellicola si comprima in spessore e si espanda in lunghezza, facendo estendere il dispositivo. I rulli a molla possono così generare forze ed espansioni notevoli pur essendo molto compatti. Kornbluh spiega che le industrie automobilistiche sono interessate a questi meccanismi come possibili sostituti dei molti piccoli motori elettrici che negli autoveicoli svolgono spesso funzioni accessorie.

Rulli flessibili. Partendo dallo stesso rullo a molla, è possibile connettere elettrodi in modo da creare due o più sezioni distinte di espansione, alimentate autonomamente, lungo la circonferenza. L'attivazione elettrica di una sezione provoca l'estensione del lato del rullo corrispondente, sicché l'intero rullo si flette in senso opposto (*si veda sempre l'illustrazione a pagina 70*). Meccanismi costruiti in base a questa idea potrebbero consentire movimenti complessi difficili da ottenere con motori e ingranaggi convenzionali. Una possibile applicazione potrebbe riguardare i cateteri e gli endoscopi per uso medico.

Attuatori tira-e-spingi. Coppie di pellicole elastomeriche dielettriche o di rulli a molla possono venire disposte in configurazione «tira-e-spingi» per lavorare in modo compensato e fornire una risposta più lineare. La commutazione della tensione da un dispositivo all'altro può spostare avanti e indietro la posizione dell'intera struttura, che diviene invece rigida in un punto «neutro» se l'attivazione interessa contemporaneamente entrambi i dispositivi. In questo modo gli attuatori funzionano come i muscoli antagonisti bicipite e tricipite che controllano i movimenti del braccio umano.

Altoparlanti. Se si stende una pellicola elastomerica dielettrica su un telaio dotato di un'apertura (*si veda l'illustrazione a pagina 72*), il diaframma così creato, espandendosi e contraendosi a una velocità correlata alla differenza di potenziale applicata, emetterà un suono. In questo modo si possono produrre altoparlanti a pannello piatto leggeri ed economici. Gli attuali modelli offrono buone prestazioni alle medie e altre frequenze. La configurazione dell'altoparlante non è ancora stata ottimizzata perché questo possa fungere da *woofer*, anche se nulla impedisce che possa funzionare bene anche alle basse frequenze.

Pompe. Il progetto di una pompa a diaframma elastomerico dielettrico è analogo a quello di un altoparlante a bassa frequenza a cui siano state aggiunte una camera per il fluido e due valvole unidirezionali per controllare il flusso. I muscoli artificiali sono particolarmente adatti per azionare micropompe, per esempio su dispositivi *lab-on-a-chip* tanto apprezzati in medicina e nell'industria.

Sensori. Per la loro stessa natura, tutti i dispositivi a elastomeri dielettrici mostrano un cambiamento di capacità elettrica quando vengono piegati o deformati. Pertanto è possibile realizzare un sensore di deformazione che funzioni a bassa tensione. Secondo Kornbluh è concreta la possibilità che le industrie automobilistiche adottino questa tecnologia come sensore per misurare la tensione delle cinture di sicurezza. Questi sensori potrebbero essere incorporati anche in tessuti e in altri materiali, come fibre, nastri o rivestimenti.

Tessuti mimetici. Collocando opportune configurazioni di elettrodi sui polimeri, è possibile far risaltare differenti schiere di punti o forme (*si veda l'illustrazione qui sopra*). Ciò potrebbe trovare applicazione in tessuti mimeticamente attivi che mutino a piacere le proprie caratteristiche di riflessione. Si potrebbero anche fabbricare meccanismi atti a ottimizzare la forma delle scanalature aerodinamiche sulle ali degli aeroplani.

Generatori di corrente. Di nuovo, dal momento che questi materiali fungono da condensatori morbidi, a partire da essi è possibile costruire generatori di corrente a capacità variabile. La DARPA e l'esercito statunitense hanno finanziato lo sviluppo di un generatore a battuta di tacco, una fonte di energia portatile che i soldati possono usare sul campo per alimentare dispositivi elettronici facendo a meno di batterie. Una persona di corporatura media che faccia un passo al secondo può produrre circa un watt di potenza utilizzando un dispositivo attualmente in fase di sviluppo (*si veda l'illustrazione qui sopra*). Von Guggenberg dice che l'idea ha attirato l'interesse dei fabbricanti di calzature. Simili dispositivi potrebbero essere inseriti anche nelle cinghie degli zaini o nelle sospensioni delle automobili. In linea di principio, questo approccio potrebbe anche essere applicato ai generatori di onde o a dispositivi a energia eolica.

I ricercatori della SRI hanno recentemente sperimentato un concetto più radicale: i «motori a polimeri». Bruciando combustibile a propano all'interno di una camera con un diaframma a elastomero dielettrico, la pressione dei prodotti di combustione fa distorcere il diaframma, generando elettricità. Un progetto del genere potrebbe condurre a generatori efficienti e di dimensioni estremamente contenute, dell'ordine del centimetro o meno.

Ma i prodotti realmente appetibili per il mercato devono ancora arrivare. «A questo punto stiamo costruendo dispositivi chiavi in mano da consegnare agli ingegneri che possano giocarci a piacimento per prendere confidenza con questa tecnologia» dice von Guggenberg. «Ci auguriamo che sia solo questione di tempo perché questa tecnologia venga presa in considerazione ogni volta che ci si accinge a progettare qualche nuovo prodotto.»

Bar-Cohen dice di essere impressionato dai progressi che il gruppo della SRI è riuscito a compiere sulla sua tecnologia di attuazione. Ma il successo ha anche creato un piccolo problema: la sfida a braccio di ferro. «Ci aspettavamo che occorressero 20 anni o giù di lì per sviluppare un braccio meccanico abbastanza forte da poter competere contro un essere umano» ride divertito. «Ora la SRI dice di essere pronta a costruirne uno, ma noi non abbiamo ancora raccolto i fondi per il premio!»

TESSITURE SUPERFICIALI VARIABILI

Il cambiamento della tessitura di una superficie può essere utilizzato nei materiali a mimetismo attivo per uso militare, in grado di alterare la propria riflettanza. Ma non solo: può per esempio migliorare il controllo del flusso di aria o di acqua sulle superfici degli aeroplani o delle navi. Anche display tattili potrebbero basarsi su cambiamenti della tessitura. Gran parte degli attuatori a elastomeri dielettrici sfruttano le deformazioni nel piano della pellicola, molto più vistose di quelle che ne interessano lo spessore, che sono a malapena percepibili. Rivestendo le pellicole sottili e gli elettrodi deformabili con uno strato molto più spesso e morbido di gel polimerico, però, si possono amplificare le variazioni di spessore fino a renderle sensibili. Via via che la pellicola si espande nel piano, il gel fa la stessa cosa e si ammucchia nei punti in cui la pellicola si comprime.

Tensione assente
Elettrodi deformabili
Rivestimento in gel polimerico passivo
Polimero dielettrico
Tensione presente
V
Rigonfiamento

Sara Chen (illustrazioni), Jamie Kripke (fotografia)

UN RIMBALZO ELETTRICO A OGNI PASSO

Gli elastomeri dielettrici possono produrre energia elettrica. Nel modo di generazione, quando l'elastomero viene deformato da una forza esterna si determina una differenza di potenziale che poi – grazie a un'appropriata elettronica – genera una corrente elettrica alla successiva variazione di forma dell'elastomero stesso, in quanto parallelamente alla forma varia anche la capacitanza effettiva del dispositivo. La densità di energia di questi materiali, quando vengono usati come generatori, è alta; ciò significa che i dispositivi di generazione possono avere un peso più contenuto di quanto sia possibile con altre tecnologie.

Gli elastomeri dielettrici sono molto adatti alle applicazioni in cui l'energia elettrica viene generata da movimenti relativamente ampi, come quelli prodotti dall'energia del vento, delle onde e delle attività umane. Per esempio, la cattura dell'energia di compressione del tacco di una scarpa quando questo batte contro il suolo durante la camminata o la corsa è un bel modo per generare energia elettrica portatile e gratuita. Il generatore a battuta di tacco fa corrispondere alla compressione del tacco la deformazione di una schiera di diaframmi multistrato.

Gli ingegneri della SRI si attendono che, con gli ulteriori sviluppi, si possa realizzare un dispositivo in grado di generare circa un watt di potenza durante la camminata normale. Un'unità in ciascuna scarpa dovrebbe fornire energia sufficiente ad alimentare, per esempio, un telefono cellulare. Un dispositivo simile viene sviluppato dall'esercito per dotare di energia elettrica i soldati durante le operazioni, ma questa tecnologia ha anche applicazioni civili.

Sara Chen (illustrazioni), Jamie Kripke (fotografia)

BIBLIOGRAFIA

PELRINE RON, KORNBLUH ROY, PEI QIBING e JOSEPH JOSE, *High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Over 100% Strain*, in «Science», vol. 287, pp. 836-839, 4 febbraio 2000.
BAR-COHEN YOSEPH (a cura), *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges*, SPIE Press Monograph, PM98, 2001.
SOMMER-LARSEN PETER e KORNBLUH ROY, *Polymer Actuators*, in *Proceedings of Actuator 2002*, VIII Conferenza internazionale sui nuovi attuatori, Brema, Germania, giugno 2002.
ZHANG Q.M. e altri, *An All-Organic Composite Actuator Material with High Electric Constant*, in «Nature», vol. 419, pp. 284-287, settembre 2002.
KORNBLUH ROY e altri, *Engineering a Muscle: An Approach to Artificial Muscle Based on Field-Activated Electroactive Polymers*, in *Neurotechnology for Biomimetic Robots*, a cura di Joseph Ayers, Joel Davis e Alan Rudolph, MIT Press, 2002.
BAR-COHEN YOSEPH (a cura), *Smart Structures and Materials 2003: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, in «Proceedings of the SPIE», vol. 5051, 2003.
Semplici demo di muscoli artificiali sono disponibili on line all'indirizzo: www.erg.sri.com/projects/muscle/recipe e ndesa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/EAP-recipe.htm
La Worldwide ElectroActive Polymer Newsletter è all'indirizzo: ndesa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/WW-EAP-Newsletter.html

MINIERE DI CARBONE A DHANBAD, Bihar, India.

L'economia del lavoro minorile

di Kaushik Basu
fotografie di Sebastião Salgado

Le campagne contro il lavoro dei bambini hanno maggiori probabilità di successo quando riescono a combinare l'azione visibile della legge con quella invisibile del mercato

LA FABBRICA DI CAMION «VENTO DELL'EST», Shiyan, Cina.

Agli esordi della rivoluzione industriale, gli inventori erano spesso molto espliciti circa gli scopi delle loro innovazioni. Il co-inventore del filatoio a rulli, il meccanico inglese John Wyatt, promuoveva la sua nuova macchina come un mezzo che avrebbe consentito alle industrie tessili di ridimensionare la forza lavoro. L'apparecchiatura era talmente facile da far funzionare, diceva Wyatt, che non sarebbe più stato necessario disporre di manodopera specializzata: sarebbero bastati i bambini. «Adottando la macchina, un'industria tessile con un centinaio di filatori alle proprie dipendenze potrebbe fare a meno di una trentina dei suoi migliori operai sostituendoli con una

decina di invalidi o di bambini», scriveva nel 1741. La presentazione convinse l'autorità competente. E questa, nel rilasciare il brevetto, sottolineò con compiacimento che «perfino bambini di cinque-sei anni» avrebbero potuto far funzionare la macchina.

L'idea che si possa lodare un'invenzione in quanto utile per facilitare il lavoro dei bambini è per fortuna una storia vecchia, almeno in Occidente. Già verso la fine del XIX secolo, il lavoro infantile era in declino nella maggior parte delle nazioni industrializzate. Ma globalmente il problema non è affatto alle nostre spalle. Nel 2000, secondo l'International Labor Organization (ILO), 186 di milioni di bambini tra i cinque e i 14 anni – circa un bambino su sei – erano lavoratori illegali, per lo più in paesi in via di sviluppo. Di questi, 111 milioni svolgevano lavori pericolosi, in miniera, nei cantieri edili e nei campi, tali da comportare conseguenze permanenti sulla salute. Circa otto milioni erano veri e propri schiavi, bambini soldato o costretti a prostituirsi.

Questi dati vanno presi con cautela. Il lavoro minorile è notoriamente difficile da quantificare o anche solo da definire. L'ILO non considera le normali attività domestiche come lavoro infantile, e tuttavia si può dire che le sue stime inquadrino il problema per eccesso, sotto alcuni aspetti, e per difetto, sotto altri. A volte, una modesta prestazione d'opera basta a classificare un bambino come lavoratore, e ciò fa lievitare le cifre; d'altronde, il lavoro domestico delle bambine, che spesso va a scapito dell'istruzione, è fortemente sottostimato. Resta un fatto su cui concordano i ricercatori: l'incidenza del lavoro minorile è troppo alta.

Ma che cosa si può fare per rimediare? La risposta dipende in modo critico dai fattori che generano il lavoro minorile e la sua persistenza. Dato il numero ampio e crescente di ricercatori che si occupano di questo argomento, ora conosciamo più a fondo il fenomeno. Non ignoriamo i risultati che ha dato l'atteggiamento di «tolleranza zero» assunto in passato da molti politici e legislatori. Era frequente, negli anni novanta, sentire appelli per il bando immediato all'importazione di prodotti del lavoro minorile. Gli attivisti di queste campagne tentavano di convincere la World Trade Organization (WTO, l'Organizzazione mondiale del commercio) a imporre sanzioni commerciali contro le nazioni in cui il lavoro minorile era prevalente. Questi appelli erano il frutto di un'errata comprensione del problema, se non – nel caso di qualche politico – di protezionismo economico mascherato da preoccupazione e sollecitudine per le sorti dei bambini.

Un esempio di effetto controproducente si è avuto in Nepal. Come descriveva uno studio dell'Unicef del 1995, negli anni novanta gli oppositori del lavoro minorile avevano esercitato forti pressioni per un boicottaggio globale dei tappeti annodati a mano dai bambini. Molti fabbricanti di tappeti reagirono semplicemente licenziando sui due piedi la manodopera infantile. Il risultato fu che molte bambine, tra 5000 e 7000, furono avviate alla prostituzione. Una campagna piena di buone intenzioni aveva finito col ritorcersi contro chi si voleva proteggere. Bastava una conoscenza appena più sofisticata dell'economia locale, per evitare un disastro.

Duro lavoro

Nel XIX secolo si tendeva ad addossare la responsabilità del lavoro minorile all'indolenza dei genitori. L'identificazione pura e semplice del lavoro minorile con l'abuso sui bambini era un comodo presupposto per giustificare l'azione legislativa, e, a furia di ripetere il concetto, la gente cominciò a crederci. Oggi, però, i più riconoscono che la causa principale del lavoro minorile non è l'indolenza, ma la povertà delle famiglie. Sono pochi i genitori che vogliono mandare i propri figli al lavoro, a meno che non vi siano costretti dalle circostanze.

Uno studio condotto nel 1991 nel Pakistan rurale illustra in che modo si concatenino cause ed effetti. Il meccanismo non è sempre ovvio. In alcune delle aree più povere, lo studio riscontrava che di fatto le famiglie relativamente più ricche tendevano a mandare i figli al lavoro più di quelle più povere. A prima vista, questo dato sembrava contraddire l'ipotesi della povertà. Ma nelle aree rurali arretrate il mercato del lavoro spesso funziona in modo inefficiente. Anche se una famiglia versa nell'indigenza e ha assoluto bisogno di aumentare il proprio reddito mandando i bambini al lavoro, il lavoro può non essere disponibile. Solo le famiglie che possiedono un po' di terra possono aggirare il problema, occupando i bambini nella loro proprietà. Dal momento che il possesso di terreni è una forma di ricchezza, non sorprende che il lavoro minorile sia più comune nelle famiglie relativamente più abbienti.

Oltre una certa soglia di ricchezza, l'incidenza del lavoro minorile inizia a diminuire. Si possono ripartire le famiglie rurali pakistane in tre categorie: marginali (quelle che possiedono meno di un ettaro di terreno), piccoli proprietari (da uno a tre ettari) e grandi proprietari (più di tre ettari). La percentuale dei bambini che lavorano aumenta dalle famiglie marginali a quelle di piccoli proprietari, ma diminuisce per i grandi proprietari. Quando una famiglia diviene ricca a sufficienza, non ha più necessità di far lavorare i bambini.

La visione per cui il lavoro minorile diminuisce con il crescere del livello economico della popolazione trova conferma nei dati statistici rilevati nel corso degli anni. In Cina, per esempio, la percentuale di bambini in età compresa tra 10 e 14 anni che lavorano – ossia il tasso di attività lavorativa minorile – è passata dal 48 per cento del 1950 al 12 per cento del 1995. L'abbattimento più drastico si è verificato negli anni ottanta, quando il tasso di crescita economica del paese ha registrato un'impennata. Più o meno lo stesso è avvenuto in Vietnam e in India, paesi per i quali gli economisti occidentali dispongono di dati più attendibili. Viceversa, in nazioni con minore crescita economica, il declino del lavoro minorile è stato irrisorio. In Cambogia, per esempio, il tasso di attività lavorativa minorile è sceso dal 29 per cento del 1950 al 25 per cento del 1995.

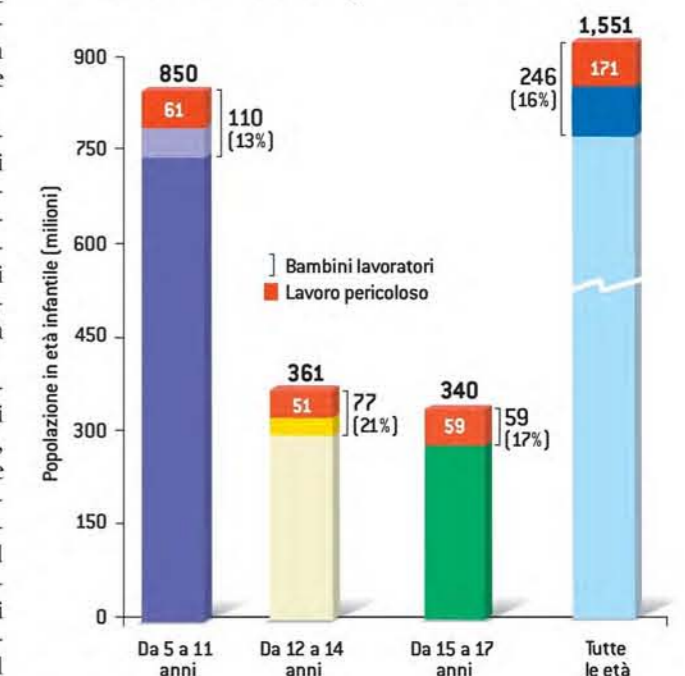
Il ruolo della povertà dei genitori fa capire come mai il lavoro minorile sia così difficile da sradicare. In Gran Bretagna questa pratica continuò a diffondersi fino al 1860 circa, a dispetto dell'adozione di nuove leggi e nuove politiche già nella prima metà del secolo. Le leggi prevedevano che le aziende che impiegavano lavoro minorile dovessero pagare un costo aggiuntivo. Si pensa-

Sebastião Salgado/Contact Press Images

CAMPI DI CANNA DA ZUCCHERO, Zona da Mata, Pernambuco, Brasile.

IN SINTESI

- Il lavoro minorile, comprese alcune delle sue forme peggiori nelle fabbriche e nelle miniere – per non parlare della prostituzione – continua a essere fiorente soprattutto, ma non solo, nei paesi in via di sviluppo. In molti casi, l'unica alternativa per un bambino è la morte per fame. Ma anche proibire categoricamente l'impiego di bambini in attività che producono beni per l'esportazione può mettere quei bambini in situazioni anche peggiori, come la schiavitù vera e propria. I politici dovrebbero pertanto fare attenzione ad adottare strategie più elastiche.
- La teoria economica indica che il lavoro minorile tende a riprodursi in un circolo vizioso: esso infatti aumenta la base di lavoratori, mantenendo bassi i salari e facendo così in modo che le famiglie siano costrette a continuare a mandare i bambini al lavoro.
- D'altra parte, invece, l'abolizione del lavoro minorile può dare origine a un circolo virtuoso, in quanto diminuisce la disponibilità di forza lavoro, facendo aumentare i salari ed eliminando così la necessità di far lavorare i bambini. Pertanto, azioni legislative mirate e provvedimenti governativi di assistenza alle famiglie potrebbero far passare un'economia dalla prima condizione alla seconda.

In genere si associa il lavoro minorile alle fabbriche, ma questo tipo di lavoro occupa in realtà solo una frazione piuttosto ridotta dei bambini economicamente attivi. La maggior parte di loro lavora in agricoltura, dalle fattorie a conduzione familiare alle grandi piantagioni. In alcuni paesi, più di un quarto dei lavoratori agricoli hanno meno di 15 anni di età.

IL LAVORO MINORILE È ANCORA MOLTO DIFFUSO NEL MONDO. L'International Labor Organization calcola che 245,5 milioni di lavoratori siano bambini o ragazzi sotto i 17 anni d'età: circa uno su sei. Di questi, 170,5 milioni fanno lavori pericolosi, che comportano condizioni di insicurezza, orari eccessivi o abuso conclamato (*in rosso*). Al di sotto dei 12 anni, si considera lavoratore chiunque lavori per una paga. Da 12 a 14 anni non è ritenuto lavoratore chi lavora fino a 14 ore alla settimana. Dai 15 anni in su è lecito svolgere qualunque lavoro che non sia pericoloso.

Fonti: International Labor Organization, 1997 (*in alto*); International Labor Organization, 2000; United Nations Population Division (*in basso*)

EQUILIBRIO SINGOLO, EQUILIBRI MULTIPLI

Le curve di domanda-offerta sono uno strumento fondamentale in economia. Le «curve» sono in realtà due linee (che possono, oppure no, essere effettivamente curve) poste su un grafico per rappresentare la disponibilità della gente ad acquistare o vendere un prodotto a seconda del suo prezzo. Normalmente le curve si intersecano in un solo punto, che indica il prezzo del prodotto in un libero mercato di compravendita (*a sinistra*).

Nei mercati del lavoro in cui i bambini sono considerati manodopera potenziale, le curve di domanda e offerta possono intersecarsi in più di un punto. Le famiglie normalmente mandano i figli al lavoro quando il loro reddito scende a livelli intollerabilmente bassi. La soglia dell'«intollerabile» cambia da società a società e da famiglia a famiglia, ma qui ignoreremo tali variazioni al fine di chiarire i principi di fondo. Supponiamo anche che il lavoro di un bambino sia equivalente a una frazione di quello di un adulto. Sulla base di questi assunti, si può disegnare una curva dell'offerta di lavoro con equilibri multipli (*a destra*).

La curva mostra quanta manodopera sia a disposizione dei datori di lavoro a seconda del salario che essi offrono. Se il salario supera il livello di sussistenza, le famiglie non mandano i figli a lavorare, e ciascuna famiglia mette a disposizione un'unità lavorativa (costituita da adulti). Se il salario è inferiore al livello di sussistenza, ciascuna famiglia mette a disposizione più di una unità lavorativa (costituita da adulti e bambini insieme).

Il comportamento dei datori di lavoro è descritto dalla curva della domanda, che normalmente pende verso il basso: perché un datore di lavoro impieghi un gran numero di lavoratori, i salari devono essere poco elevati.

Questo mercato può tendere verso due punti di equilibrio. O i salari sono alti, e lavorano solo gli adulti, o i salari sono bassi, e lavorano sia adulti sia bambini. Con presupposti più raffinati, la curva dell'offerta potrebbe apparire differente. Per esempio, se i bambini lavorassero solo per colmare la differenza tra il reddito dei genitori e il livello di sussistenza, allora il segmento orizzontale della curva dell'offerta prenderebbe una pendenza verso il basso (un'iperbole, per la precisione). Ma rimangono equilibri multipli.

Quando un mercato ha un solo punto di equilibrio, misure come la messa al bando del lavoro minorile devono combattere contro le tendenze naturali del mercato locale. Anche se queste misure avessero successo, lo otterrebbero al prezzo di inefficienze economiche che possono creare un insieme diverso di problemi sociali.

Gli equilibri multipli eliminano questo dilemma. Se una nazione si trova in uno stato di equilibrio, una misura di messa al bando potrebbe farla tendere verso un altro equilibrio, e a quel punto il mercato lavorerebbe a favore, e non contro, i provvedimenti politici. Da un punto di vista strettamente economico, tutti questi equilibri sono egualmente efficienti.

NEI MANUALI DI ECONOMIA (*a sinistra*) la curva di offerta del lavoro è una linea retta che tende verso l'alto (ciò significa che alti salari attraggono più lavoratori); la curva della domanda va invece verso il basso (alti salari scoraggiano l'assunzione da parte dei datori di lavoro); le due curve si incontrano in un solo punto. Nei paesi poveri, la curva dell'offerta può avere un andamento a gradino (*a destra*). I bassi salari di fatto attraggono più lavoratori, dal momento che i bambini devono entrare nella forza lavoro perché le famiglie possano raggiungere il livello di sussistenza. Quando questo avviene, le curve della domanda e dell'offerta si possono incontrare in più di un punto.

Nina Finkel

va che, rendendo meno conveniente assumere i bambini, si tendesse ad abbassarne i salari e quindi a rendere meno vantaggioso per le famiglie mandarli al lavoro. Paradossalmente, si otteneva l'effetto di farli lavorare per un numero di ore maggiore, per compensare la riduzione di salario. È stesso rischio che si corre con leggi moderne, come l'India's Child Labor Act del 1986, che impone ammende alle aziende che impiegano minori.

Ristabilire l'equilibrio

Alcuni commentatori, osservando i dati, saltano subito alla conclusione che non vi sarebbe alcun senso o necessità nelle azioni governative contro il lavoro minorile. Ma anche questa è una reazione eccessiva. In certe situazioni, un bando legale può essere estremamente utile per eliminare il lavoro minorile senza ripercussioni negative per i bambini e per le loro famiglie. Questo emerge dall'analisi delle curve della domanda e dell'offerta.

Queste mostrano come fa un mercato a raggiungere un equilibrio nel quale il prezzo di un prodotto viene regolato in modo da assicurare che la domanda equivalga all'offerta. Nel caso dei mercati del lavoro, il prodotto è la quantità di lavoro che viene eseguito e il prezzo si definisce saggio salariale (il salario medio pagato per unità di lavoro). Quest'ultimo determina la disponibilità dei lavoratori a lavorare (l'offerta) e quella dei datori di lavoro ad assumere (la domanda). Nel modello standard che si impara sui libri di testo, se il saggio salariale aumenta, l'offerta di lavoro cresce, ma la domanda diminuisce; se viceversa il saggio salariale si abbassa, la domanda sale. Vi è solo un valore del saggio salariale in corrispondenza del quale domanda e offerta coincidono.

Alcuni mercati, però, sono diversi da questo caso da manuale, e sono caratterizzati da equilibri multipli: vale a dire, presentano più di un saggio salariale per cui la domanda corrisponde all'offerta. I mercati del lavoro nei paesi poveri ne sono un esempio. Si consideri un paese in cui i salari degli adulti sono bassi e i bambini (proprio per questa ragione) sono mandati a lavorare. Si supponga che il lavoro minorile sia bandito (e che il bando venga rispettato, ovviamente). Le aziende che prima impiegavano bambini cercheranno adulti per riempire i vuoti. Dovendo competere per una base più ristretta di lavoratori, dovranno pagare un salario più alto. Probabilmente, se i salari fossero stati alti fin dall'inizio, i genitori non avrebbero mandato i bambini a lavorare. Si supponga che la legge venga poi revocata: guadagnando ormai a sufficienza, i genitori non avranno più nessuna necessità di far lavorare i propri figli.

La legge serve semplicemente da meccanismo per spostare l'economia da un equilibrio, in cui i salari sono bassi e i bambini sono costretti a lavorare, all'altro, in cui i salari sono congrui e i bambini possono andare regolarmente a scuola (*si veda la finestra nella pagina a fronte*). Una volta che l'economia inizi a gravitare attorno al nuovo punto di equilibrio, lo stesso interesse dei datori di lavoro e dei lavoratori tenderà a mantenere la nuova situazione, anche nel corso di crisi economiche di minore entità come una recessione. La legge agisce una volta per tutte. In una pubblicazione che ho scritto con Pham Hoang Van, dell'Università del Missouri, abbiamo definito queste norme «interventi legislativi benigni», per distinguerle da quelle di routine che richiedono una continua sorveglianza e rivestono un costante ruolo di minaccia di azione punitiva (*si veda la finestra qui a fianco*).

Nei modelli teorici, gli economisti spesso trattano lo spostamento da un equilibrio all'altro come se fosse privo di costi. In realtà, non è così. Le imprese che erano abituate a impiegare bambini potrebbero trovarsi nella necessità di fare investimenti in tecnologie per affrontare la nuova situazione, e il Governo dovrà costruire nuove scuole. Nondimeno, i modelli si ispirano a quanto è già accaduto nel corso della storia analizzando, per esempio, il ruolo svolto dalla legislazione in quanto a riduzione del lavoro minorile nell'America della fine del XIX secolo.

In trappola

Gli equilibri multipli si manifestano anche in altri modi. Una famiglia che mandi a lavorare i propri figli viene disapprovata dal contesto sociale in cui si trova in maniera inversamente proporzionale alla quantità di lavoro minorile che viene sfruttata in quella società. Vale a dire: se il lavoro minorile è diffuso, la gente ci avrà fatto l'abitudine, e la riprovazione sarà minore. Per vedere come ciò possa condurre a equilibri multipli, supponiamo che lavorino pochi minori. I genitori di quei bambini devono subire la disapprovazione di amici e vicini di casa. Pertanto, solo

L'AUTORE

KAUSHIK BASU è professore di economia, Carl Marks Professor of International Studies e direttore del Program on Comparative Economic Development presso la Cornell University. Dopo il diploma di scuola superiore conseguito a Delhi – racconta – suo padre voleva che studiasse fisica, mentre lui «non voleva studiare nulla». Alla fine si misero d'accordo su economia. Inizialmente Basu trovava la materia fredda e poco attraente, ma una volta alla London School of Economics rimase affascinato dal ragionamento deduttivo su cui si basa l'economia e decise di dedicarsi con entusiasmo alla carriera di economista.

INTERESSI CONTRAPPOSTI

Il concetto degli equilibri multipli si applica anche a situazioni diverse dal lavoro minorile. In generale, oggi si accetta l'idea che le economie di mercato siano più efficienti di quelle centralizzate. Nel momento in cui gli individui perseguono il proprio interesse, le loro azioni rendono la vita migliore per tutti. C'è chi arriva a credere che la ragione individuale sia sempre sufficiente a conseguire il fine sociale desiderato, ma i modelli economici a equilibri multipli smentiscono tale impostazione.

Si consideri il dibattito verificatosi nel XIX secolo sulla prospettiva di stabilire per legge un limite agli orari lavorativi. L'argomentazione liberistica standard era che, se un lavoratore era disposto a lavorare 14 ore al giorno, e un datore di lavoro a pagare per questo, lo Stato non aveva ragione di intervenire. Farlo sarebbe stata un'ingerenza paternalistica.

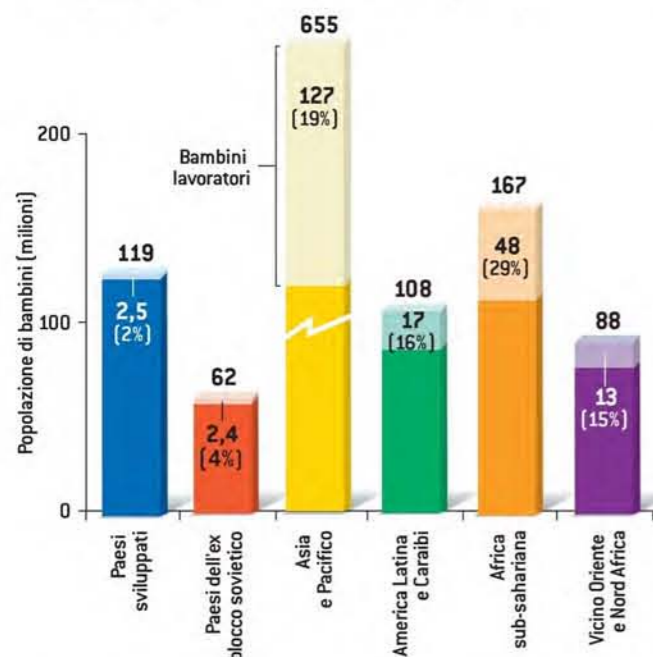
Un argomento più raffinato considererebbe sia la domanda sia l'offerta. Si supponga che vi siano 100 lavoratori e numerosi datori di lavoro, e che il salario di sussistenza sia di 12 dollari al giorno. Ogni lavoratore preferirebbe dedicare al lavoro otto ore al giorno per guadagnare i suoi 12 dollari e accetterebbe di lavorare di più solo se fosse necessario per raggiungere il livello di sussistenza. Se la paga oraria fosse di due dollari, i lavoratori guadagnerebbero 16 dollari al giorno dedicando otto ore al lavoro, per un'offerta totale di 800 ore-uomo al giorno. Se la paga fosse di un dollaro l'ora, i lavoratori dovrebbero rimanere al lavoro 12 ore per raggiungere il reddito di sussistenza, e l'offerta totale sarebbe di 1200 ore-uomo.

FONDERIA SHIH-YEN, Provincia di Hupei, Cina.

In questo scenario, i livelli di salario di un dollaro l'ora e di due dollari l'ora sono entrambi punti di equilibrio: per tali valori, la domanda equivale all'offerta. Se l'economia tendesse all'equilibrio corrispondente a un dollaro all'ora, ciascun lavoratore vorrebbe lavorare 12 ore al giorno. Tuttavia, un limite di otto ore fissato per legge potrebbe essere giustificato nell'interesse del lavoratore. Tutti i lavoratori punterebbero verso l'equilibrio che consente di lavorare solo otto ore, ma non hanno modo di raggiungerlo a meno che non agiscano collettivamente. Sicuramente, l'equilibrio basato sul salario più alto è meno favorevole per gli imprenditori. Ciascun equilibrio ha chi vince e chi perde. I dibattiti politici in economia sono spesso polarizzati tra chi vede un mercato privo di impedimenti come il solo strumento di progresso economico e chi affiderebbe tutto al controllo del Governo. Il concetto degli equilibri multipli è un esempio dell'importanza della via intermedia, che riconosce sia il ruolo dei mercati, sia la necessità d'interventi governativi.

Si stima che più di otto milioni di bambini siano venduti come schiavi a causa dei debiti delle famiglie oppure costretti a fare i soldati o a svolgere attività illecite come la prostituzione. Circa mezzo milione di loro vive in aree sviluppate, come gli Stati Uniti e l'Unione Europea, dove sono sfruttati prevalentemente nella prostituzione o nel traffico di stupefacenti. È probabile che ogni anno1,2 milioni di bambini attraversino illegalmente le frontiere.

LE PEGGIORI FORME DI LAVORO MINORILE

	Numero di bambini (milioni)
Lavoro forzato	5.7
Reclutamento forzato in conflitti armati	0.3
Prostituzione e pornografia	1.8
Attività illecite (incluso traffico di droga)	0.6

IN TERMINI ASSOLUTI, IL MAGGIOR NUMERO DI BAMBINI LAVORATORI vive nei paesi in via di sviluppo dell'Asia meridionale e orientale. In termini relativi, però, la prevalenza massima di lavoro minorile si trova nell'Africa subsahariana, dove si stima che il 29 per cento dei bambini di 5-14 anni lavori per sopravvivere. Nei paesi sviluppati, il lavoro minorile è meno comune, ma non è completamente scomparso. (In questo diagramma, i dati sulla popolazione infantile differiscono leggermente da quelli a pagina 79 a causa di una revisione delle stime demografiche.)

coloro che hanno davvero una grande necessità di mandare i figli al lavoro, lo faranno. Quindi, continueranno a lavorare solo pochi bambini. La società si trova in uno stato di equilibrio: la bassa prevalenza di lavoro minorile tende a perpetuarsi.

Se, d'altro canto, sono molti i bambini che lavorano, la disapprovazione sociale del lavoro minorile è più moderata. Sono di più i genitori che fanno lavorare i bambini, e di nuovo la società si trova in uno stato di equilibrio. Se la prevalenza di lavoro minorile è intermedia tra queste due situazioni, la società è fuori dall'equilibrio, e dovrà passare attraverso un periodo di transizione fino a quando non raggiungerà uno degli equilibri.

Un altro tipo di equilibrio agisce attraverso il circolo vizioso della povertà. Le persone che hanno lavorato nella loro infanzia hanno ricevuto un'istruzione più scarsa, e tendono a essere povere da adulte: allora è più probabile che facciano lavorare anche i figli. E così le famiglie si ritrovano intrappolate in un circolo perpetuo di lavoro minorile; nella situazione opposta, potrebbero finire in un circolo virtuoso di benessere crescente. Questa teoria è stata recentemente messa alla prova e convalidata utilizzando un grande insieme di dati su famiglie brasiliane. I genitori che lavoravano da bambini erano effettivamente più disposti a mandare a lavorare anche i propri figli.

Peraltro, questa tendenza era vera anche quando gli sperimentatori verificavano i redditi degli adulti. I genitori che avevano lavorato da bambini erano propensi a far lavorare i figli più facilmente rispetto a chi, pur avendo lo stesso reddito, non aveva sperimentato il lavoro minorile. Quindi, per quanto l'economia sia il fattore principale nel lavoro minorile, non è l'unico. I genitori che hanno una storia di lavoro minorile finiscono per attribuire meno importanza all'istruzione scolastica dei propri figli.

La tendenza del lavoro minorile a essere passato di padre in figlio, per effetto di fattori sia economici sia sociali, sembra precludere ogni via d'uscita. Ma l'inverso, ossia la tendenza alla definitiva scomparsa del fenomeno, una volta che lo si sia eliminato o limitato, lavora a favore del cambiamento. Gli equilibri multipli sono strettamente legati al fenomeno del *tipping*, per cui un piccolo mutamento può avere un immediato, imponente effetto. Consideriamo una società che abbia equilibri multipli e si trovi nello stadio in cui vi è un'alta incidenza di lavoro minorile. E supponiamo che attraverso qualche tipo di intervento, come un'azione legislativa o un lento mutamento delle attitudini, il lavoro minorile venga meno a poco a poco. A un certo punto, il mercato del lavoro si sposterà nella zona di attrazione dell'altro equilibrio. A questo punto, lo sfruttamento del lavoro minorile finirà rapidamente, anche senza ulteriori interventi. Negli Stati Uniti il lavoro minorile ha continuato a essere diffuso fino al 1900, nonostante più di 70 anni di tentativi, da parte dei governi dei singoli Stati, di metterlo al bando. Ma quando finalmente ha iniziato a diminuire, il declino è stato estremamente rapido. Intorno al 1930, il lavoro minorile era quasi scomparso.

IMPIANTO DI PRODUZIONE DELL'ACCIAIO, Il Cairo, Egitto.

Un passo per volta

Un amico tentò una volta di persuadermi a praticare regolarmente *jogging* assicurandomi che ogni 10 minuti di esercizio la mia aspettativa di vita sarebbe aumentata di otto minuti. A prima vista, può sembrare un buon incentivo, ma tutto dipende da ciò che uno vuole ottenere nella vita. Se ciò che si vuole massimizzare è la vita non trascorsa a correre, c'è di che preoccuparsi: quei 10 minuti di jogging fanno accorciare la vita di non-jogging di due minuti. Per quanto inopportuno possa sembrare questo esempio, richiama un fatto importante e spesso trascurato: a rendere più o meno desiderabile una particolare politica sono suoi obiettivi ultimi.

Se il controllo del lavoro minorile non è fine a se stesso, ma è uno strumento per consentire ai bambini di crescere come individui maturi e felici, allora le politiche devono essere valutate rispetto a questo fine più ampio, e non solo in base al fatto che arrestino il lavoro minorile. Nelle regioni più povere, è possibile che le società debbano permettere ai bambini di lavorare per alcune ore al giorno. Gli studi condotti in Perù e in Brasile hanno dimostrato che il lavoro minorile è spesso il solo modo che questi bambini hanno per finanziare la propria istruzione o quella dei fratelli più piccoli, e quindi offrire ai propri figli una via di scampo dalla miseria. Questi risultati sollevano inquietanti questioni morali, ma se si vuole che la politica sia efficace occorre fare i conti con la nuda realtà della vita delle persone.

Molti commentatori hanno sostenuto – e io sono d'accordo con loro – che l'azione legislativa non è il modo migliore per controllare il lavoro minorile, fatta eccezione per alcuni casi particolari, come quando si ha ragione di credere che vi siano equilibri multipli. In generale, i politici dovrebbero agire per migliorare il tenore di vita degli adulti in modo da diffondere condizioni di vita che sconsiglino l'invio dei bambini al lavoro. Per esempio, in una fase di flessione economica, le fluttuazioni di reddito potrebbero costringere i genitori a sottrarre i propri figli alla scuola. Anche se questi bambini torneranno a studiare, troveranno difficile il reinserimento e spesso lasceranno la scuola definitivamente. Offrendo ai genitori crediti facilitati e assicurazioni, li si potrebbe aiutare a far fronte ai periodi di crisi senza far ricorso al lavoro minorile. Piccoli incentivi – come l'offerta ai bambini del pasto di mezzogiorno, o un sussidio ai genitori che fanno studiare i figli – potrebbero contribuire a ridurre notevolmente il lavoro minorile, come si è osservato in Brasile e Bangladesh.

Nell'affrontare questo problema è facile cadere nella trappola dell'accondiscendenza, lasciando tutto ai mercati, o ai fautori di un rigorismo morale che cerca di eliminare il fenomeno in un colpo solo, senza preoccuparsi del benessere dei presunti beneficiari di una tale politica. Oggi, invece, abbiamo informazioni e strumenti sufficienti per agire nel modo più efficace per sanare la piaga del lavoro minorile usando moderazione e un'oculata progettazione degli interventi politici.

BIBLIOGRAFIA

BASU KAUSHIK e PHAM HOANG VAN, *The Economics of Child Labor*, in «American Economic Review», vol. 88, pp. 412-427, giugno 1998.
BASU KAUSHIK, *Child Labor: Cause, Consequence and Cure with Remarks on International Labor Standards*, in «Journal of Economic Literature», vol. 37, pp. 1083-1119, settembre 1999.
TUTTLE CAROLYN, *Hard at Work in Factories and Mines: The Economics of Child Labor during the British Industrial Revolution*, Westview Press, 1999.
BHALOTRA SONIA e HEADY CHRIS, *Child Farm Labor: The Wealth Paradox*, settembre 2001.
Disponibile on line all'indirizzo: www.bris.ac.uk/Depts/Economics/research/pdffiles/dp00492.pdf
EDMONDS ERIC e PAVCNIK NINA, *Does Globalization Increase Child Labor? Evidence from Vietnam*, «NBER Working Paper» n. 8760, gennaio 2002.
Disponibile on line all'indirizzo: papers.nber.org/papers/w8760
LOPEZ-CALVA LUIS-FELIPE, *A Social Stigma Model of Child Labor*, in «Estudios Economicos», vol.17, n. 2, luglio-dicembre 2002.
Disponibile on line all'indirizzo: mailweb.udlap.mx/~llec www/documentos/Lopez-Calva-revisado-stigma.pdf
EMERSON PATRIK e SOUZA ANDRE, *Is There a Child Labor Trap? Intergenerational Persistence of Child Labor in Brazil*, in «Economic Development and Cultural Change», vol. 51, n. 2, pp. 375-398, gennaio 2003.
Disponibile on line all'indirizzo: www.vanderbilt.edu/ Econ/wparchive/workpaper/vu02-w14.pdf
Per le statistiche sul lavoro minorile, si visiti il sito della International Labor Organization: www.ilo.org

I dinosauri nani dell' Arcipelago europeo

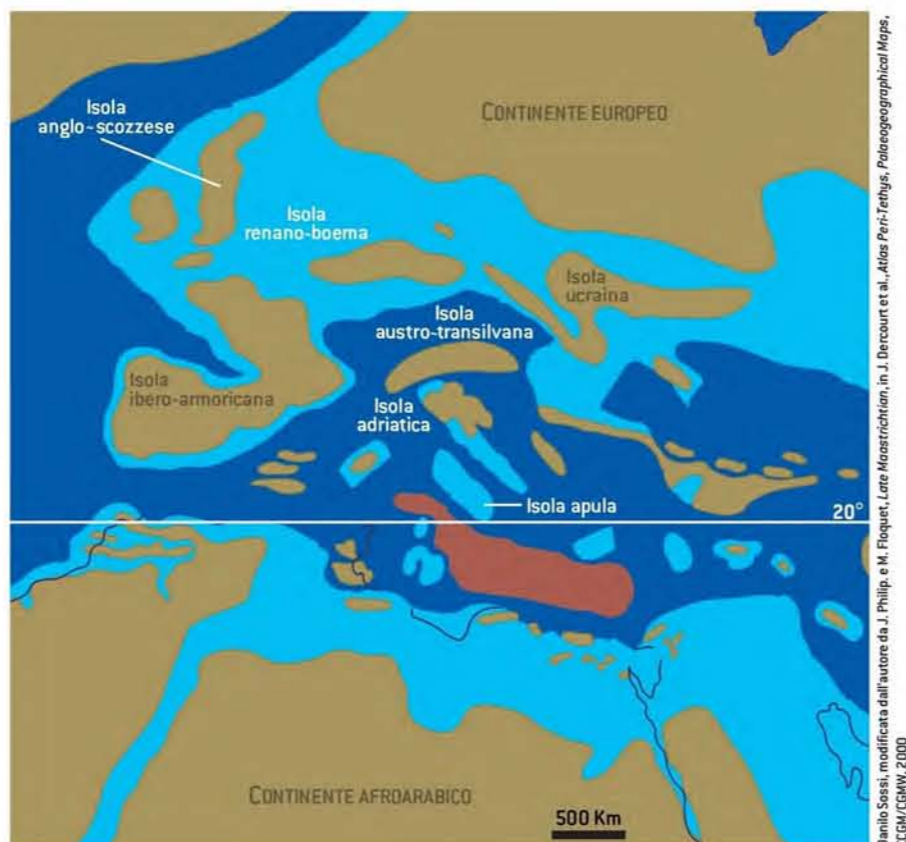
di Fabio Marco Dalla Vecchia

Frammentata in una miriade di isole, durante il Cretaceo l'Europa ospitava dinosauri che appaiono decisamente piccoli rispetto a quelli che prosperavano sui continenti

Cortesia Fabio Marco Dalla Vecchia

NELLA VALLE DEL SIBISEL – vicino al villaggio di Sinpetru, nella conca di Hateg, in Transilvania – affiorano depositi fluviali e lacustri della fine del Cretaceo contenenti resti di dinosauri, coccodrilli, tartarughe, pterosauri e altri animali terrestri e acquatici. Le dimensioni ridotte dei dinosauri spinsero Ferenc Nopcsa a ipotizzare già nel 1912 che si trattasse di forme nane insulari.

Durante il Cretaceo, tra 144 e 65 milioni di anni fa, l'Europa così come la conosciamo oggi non esisteva ancora. L'attuale struttura geografica del nostro continente si deve soprattutto alla sua collisione con il continente africano, iniziata proprio durante il Cretaceo. Questa collisione ha avuto il suo acme negli ultimi 20 milioni di anni, portando alla formazione di catene montuose come le Alpi e i Carpazi. Inoltre, l'odierna Europa meridionale è il risultato dell'innesto lungo il margine della placca euroasiatica di «blocchi» o microplacche che si trovavano originariamente nell'Oceano della Tetide tra questa e la placca afroarabica. A rendere ancora meno familiare il panorama geografico, il livello medio del mare, durante il Cretaceo, era decisamente più alto di quello attuale, e quindi l'estensione delle terre emerse era minore.

Isola anglo-scozzese
Continente europeo
Isola renano-boema
Isola ucraina
Isola austro-transilvana
Isola ibero-armoricana
Isola adriatica
Isola apula
20°
Continente afroarabico
500 Km

Danilo Sossi, modificata dall'autore da J. Philip e M. Floquet, *Late Maastrichtian*, in J. Dercourt et al., *Atlas Peri-Tethys, Palaeogeographical Maps*, CCGM/CGMW, 2000

In particolare, una tendenza globale all'aumento del livello dei mari (detta «trasgressione» dai geologi), particolarmente intensa a partire da 110 milioni di anni fa, provocò la sommersione di zone piatte del continente, dando origine a numerose aree insulari, che nell'insieme sono chiamate con il nome evocativo di «Arcipelago europeo». Il livello marino globale raggiunse la massima altezza circa 90 milioni di anni fa, quando, secondo alcuni studiosi, era oltre 250 metri più alto di quello attuale. La presenza e l'estensione di queste isole – variabile su scala geologica a causa sia delle oscillazioni a breve termine del livello dei mari sia dei movimenti verticali della crosta terrestre – è rintracciabile nelle recenti mappe paleogeografiche di Jean Dercourt, dell'Università Pierre e Marie Curie di Parigi, e collaboratori.

Il concetto di isola è chiaro a tutti, ma in realtà non c'è una definizione rigorosa che permetta di distinguere tra una grande isola e un piccolo continente. La definizione del dizionario («porzione di terra emersa completamente circondata da acqua e di dimensioni nettamente più ridotte del continente più piccolo, l'Australia») è valida per la situazione geografica attuale, ma che cosa si poteva intendere per isola durante il Cretaceo? Il concetto sfuma in quello di continente con l'aumento dell'estensione territoriale. Possiamo considerare come la più grande isola dell'Arcipelago europeo alla fine del Cretaceo la terra ibero-armoricana o ibero-occitana, perché allora era circondata dal mare ed era molto meno estesa della zona emersa posta a settentrione (continente europeo) e a meridione (continente afroarabico).

L'Arcipelago europeo si estendeva alle latitudini medio-basse, approssimativamente tra i 20 e 40 gradi nord.

I dinosauri dell'Arcipelago europeo

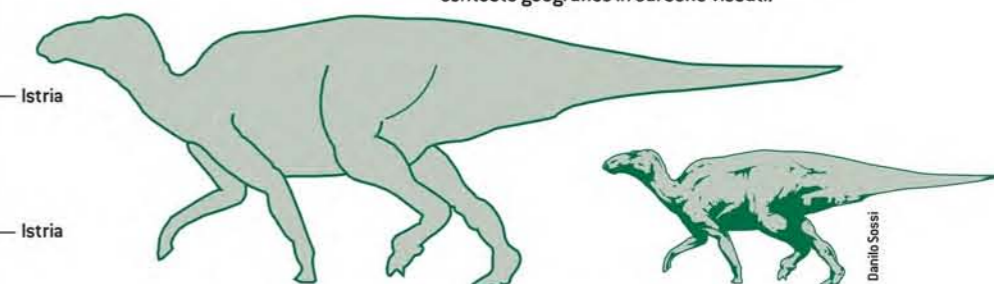
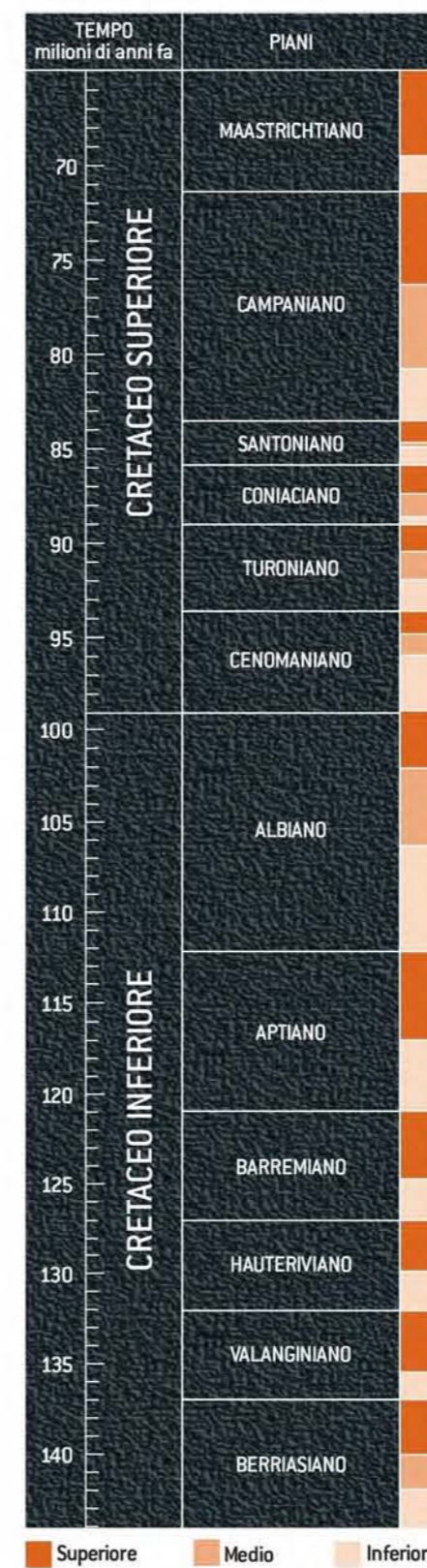
Resti fossili di dinosauri vissuti tra 100 e 65 milioni di anni fa sono stati scoperti in numerose regioni europee: Spagna, Francia, Inghilterra, Limburgo (una regione che si trova in parte in Belgio e in parte nei Paesi Bassi), Germania, Austria, Italia, Croazia, Slovenia, Boemia e Moravia, Ungheria, Transilvania (Romania) e Crimea (Ucraina). I fossili furono inizialmente rinvenuti in Francia, nella prima metà del XIX secolo, in rocce che ancora oggi continuano a dimostrarsi preziose fonti di reperti. Molti paesi, come la Spagna, l'Italia e la Croazia, hanno fornito testimonianze significative solo in tempi recenti.

Il concetto di dinosauri nani nasce proprio da fossili scoperti in un'ex isola dell'Arcipelago europeo, e fu concepito dal barone transilvano Ferenc Nopcsa, uno strano personaggio dalla vita eccentrica e avventurosa. L'idea fu presentata a Vienna il 27 novembre 1912, durante una riunione della Zoologische Botanische Gesellschaft e brevemente riassunta in una nota pubblicata nel 1914. Nopcsa aveva notato che tutti i dinosauri della Transilvania erano sensibilmente più piccoli di quelli rinvenuti in Nord America e Africa orientale, e aveva collegato questo fenomeno al noto nanismo degli elefanti vissuti nelle isole del Mediterraneo durante il Pleistocene. Le ridotte dimensioni dei dinosauri transilvani erano dunque da imputarsi al loro confinamento su un'isola.

Le peculiari caratteristiche delle faune insulari

Le faune insulari sono generalmente diverse da quelle che popolano i continenti. Il numero di specie in comune con il continente più vicino è inversamente proporzionale alla distanza dell'isola, e la presenza di specie endemiche è tanto maggiore quanto più lunga è stata la segregazione insulare. Inoltre, il numero delle specie, ovvero la diversità faunistica, è direttamente proporzionale alle dimensioni dell'isola.

Per quanto riguarda le faune a vertebrati delle isole, sono già da tempo note alcune caratteristiche comuni osservate sia nelle specie viventi sia in quelle fossili del Pleistocene. Per prima cosa, le specie vegetariane, soprattutto se ad alta densità di popolazione, presentano dimensioni individuali sensibilmente

LA TETIDE CENTRALE ALLA FINE DEL MAASTRICHTIANO (65 milioni di anni fa) in una mappa semplificata tratta da un lavoro di J. Philip e M. Floquet. Vari blocchi che all'epoca erano isolati al centro della Tetide sono stati incorporati al margine meridionale dell'Eurasia durante l'orogenesi alpina. Poiché l'Africa e la Penisola arabica rimasero unite fino all'apertura del Mar Rosso, nel Cenozoico, si parla di continente afroarabico. L'Isola apula è indicata come un basso fondale marino. In realtà, la presenza in Puglia di testimonianze fossili di dinosauri e piante terrestri indica l'esistenza di zone emerse almeno dal Coniaciano al Campaniano-Maastrichtiano. In marrone, il bacino apertosi tra l'Afroarabia e le piattaforme carbonatiche della Tetide centrale circa 120 milioni di anni fa.

L'AUTORE

FABIO MARCO DALLA VECCHIA si è laureato in scienze geologiche all'Università di Bologna ed è diventato dottore di ricerca in paleontologia dei vertebrati all'Università di Modena. Attualmente è curatore del Museo paleontologico di Monfalcone (Gorizia). Ha partecipato a numerose campagne di scavo in Italia e all'estero. È autore di oltre 50 pubblicazioni scientifiche in riviste nazionali e internazionali riguardanti la paleontologia (soprattutto dinosauri e pterosauri) e la geologia dell'Italia nordorientale, dell'Istria e del Medio Oriente.

LA DATAZIONE dei principali siti scoperti sulle diverse isole dell'Arcipelago europeo permette di osservare come la maggior parte dei fossili sia riferibile alla parte finale del Cretaceo superiore.

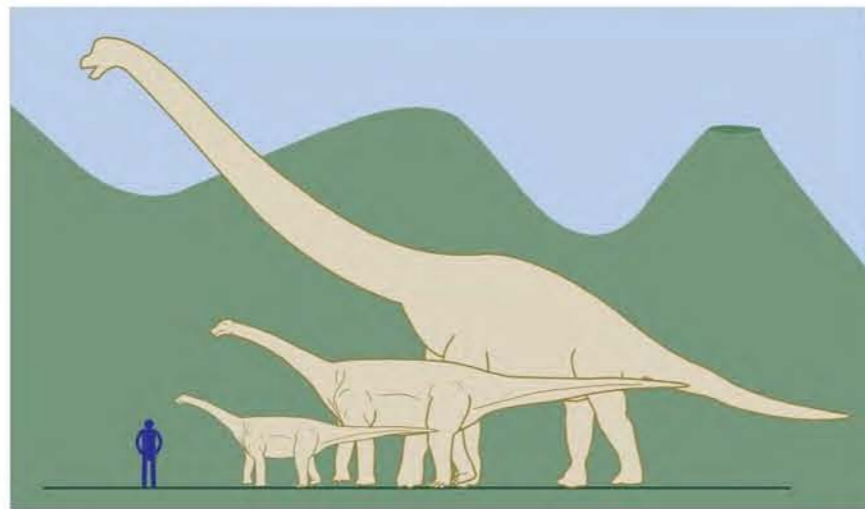
LA DIFFERENZA DI MASSA CORPOREA fra un adrosauro europeo come *Telmatosaurus* – o come quelli del Villaggio del Pescatore (Trieste), lunghi 4-5 metri – e un adrosauro del continente nordamericano – per esempio un esemplare di medie dimensioni del genere *Edmontosaurus* della fine del Maastrichtiano (*a sinistra*) – è probabilmente legata al diverso contesto geografico in cui sono vissuti.

Danilo Sossi

IN SINTESI

- Durante il Cretaceo, tra 110 e 65 milioni di anni fa, l'innalzamento del livello marino e i movimenti della crosta terrestre portarono alla formazione di isole (l'Arcipelago europeo) tra il grande continente afroarabico e un continente europeo rappresentato dall'odierna Europa settentrionale.
- Le faune insulari attuali e del Pleistocene presentano caratteristiche peculiari: gli animali vegetariani hanno dimensioni assai minori rispetto ai loro simili che vivono sul continente, sono frequenti i casi di ritenzione di caratteri primitivi, endemismo e sopravvivenza di gruppi da tempo estinti sui continenti. Infine, sono assenti i grandi predatori.
- Nel Cretaceo i grandi animali terrestri, sia vegetariani sia carnivori, erano dinosauri. Lo studio dei dinosauri dell'Arcipelago europeo ci permette di verificare l'effetto dell'insularità su questi animali estinti.
- I dinosauri dell'Arcipelago europeo avevano dimensioni più ridotte di quelli continentali, proporzionali a quelle ipotizzate per le isole. Gli endemismi sono comuni, come pure la ritenzione di caratteri primitivi. Questi dinosauri hanno quindi i caratteri dell'insularità rispetto a quelli continentali, ma dimensioni decisamente maggiori dei mammiferi insulari del Pleistocene.

Cortesia Fabio Marco Dalla Vecchia

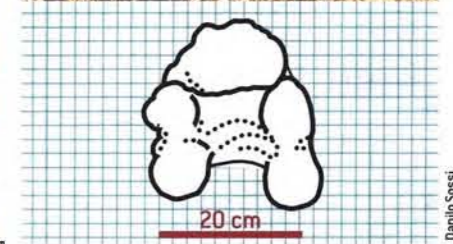
IL SITO DI BELLEVUE, nella valle dell'Aude, nei Pirenei francesi. Qui sono stati trovati resti del sauropode *Ampelosaurus atacis*. Di recente è stato portato alla luce uno scheletro quasi completo, «Eva», che nella foto giace ancora in parte sepolto sul lato destro della zona di scavo. Altri dinosauri della valle dell'Aude sono *Rhabdodon* e *Struthiosaurus*. Il sito risale al Campaniano superiore-Maastrichtiano inferiore. A destra: il confronto tra le dimensioni stimate dei sauropodi che popolavano l'Istria nel Cenomaniano superiore, circa 95 milioni di anni fa (sauropode piccolo), le dimensioni di «Eva», l'esemplare più completo di *Ampelosaurus*, vissuto circa 70-72 milioni di anni fa nell'Isola ibero-armoricana, e *Sauroposeidon* dell'Aptiano-Albiano del continente nordamericano (sauropode grande).

Danilo Sossi

minori di quelle simili che vivono sul continente. Un caso emblematico, in questo senso, è quello degli elefanti. L'elefante africano (*Loxodonta africana*) può superare le cinque tonnellate di peso, anche se la media è più bassa. *Elephas falconeri*, che viveva in Sicilia e a Malta nel Pleistocene, era alto 90-100 centimetri al garrese, e la sua massa corporea è stimata in appena 60-200 chilogrammi.

La causa principale del nanismo dei grandi erbivori sembra risiedere nella limitatezza delle risorse alimentari delle isole. Secondo Louise V. Roth, del Dipartimento di biologia della Duke University, in North Carolina, se una popolazione isolata raggiunge un'alta densità, che non può essere ridotta dalla migrazione, la conseguenza è il sovraffollamento, la distruzione dell'habitat, l'arresto dello sviluppo e, alla fine, la selezione naturale di individui adatti a un minore consumo di cibo. Nelle isole, la variabilità intraspecifica è spesso elevata, si sviluppano strutture aberranti, e sono frequenti i casi di ritenzione di caratteri primitivi e di sopravvivenza di gruppi sistematici da tempo estinti sui continenti. Dunque, le specie insulari possono mostrare caratteri che non sono più presenti in specie affini evolutesi sul continente. Infine, i grandi predatori sono generalmente assenti.

Lo studio di Gary Burness, della Queen's University di Kingston, nell'Ontario, e collaboratori, riguardante gli erbivori e i carnivori terrestri di massime dimensioni (*top terrestrial herbivore and carnivore species*) che hanno popolato isole e continenti negli ultimi 65.000 anni, ha evidenziato che la massa corporea delle specie di massime dimensioni cresce con l'aumentare della superficie dell'areale di distribuzione: vale a dire, le specie di massime dimensioni sui continenti sono più grandi che sulle isole. Inoltre, in un dato areale le dimensioni corporee diminuiscono secondo la sequenza: erbivoro ectotermico (quello che impropriamente si definisce «a sangue freddo»), erbivoro endotermico («a sangue caldo»), carnivoro ectotermico, carnivoro endotermico. Un animale endotermo ha lo stesso consumo di cibo di un ectotermo con una massa corporea 10 volte

ALCUNE OSSA DI *AMPELOSAURUS* esposte nel sito di Bellevue. Si notino le dimensioni relativamente ridotte.

Cortesia Fabio Marco Dalla Vecchia

Danilo Sossi

LA PIÙ GRANDE ORMA della zampa anteriore di sauropode rinvenuta nell'Albiano dell'Istria (Isola adriatica, *sotto*) è decisamente più piccola di quella di un sauropode grosso modo coevo, ma che viveva lungo il margine del continente nordamericano (*sopra*).

maggiore, perché le necessità metaboliche di quest'ultimo sono corrispondentemente minori. Quindi, un'isola che può nutrire un vegetariano endotermo di 500 chilogrammi, potrebbe permettere la presenza di un ectotermo di cinque tonnellate.

Durante il Cretaceo, la fauna era decisamente diversa da quella attuale. I grandi animali terrestri, tanto vegetariani quanto carnivori, erano rappresentati dai dinosauri. Tra le specie terrestri più grandi si annoveravano i sauropodi, quadrupedi di dimensioni spesso gigantesche, tanto che alcuni testi indicano 12 metri come lunghezza minima degli esemplari adulti. Verso la fine del Cretaceo, in Nord America e in Asia i sauropodi furono quasi completamente sostituiti da altri vegetariani: gli adrosauridi (dinosauri dal becco d'anatra) e, solo in Nord America, i ceratopsidi (i dinosauri cornuti). I carnivori erano rappresentati dai teropodi, predatori bipedi che espressero una vasta gamma di dimensioni e probabilmente diedero origine agli uccelli. Rettili erano anche i massimi predatori marini, e nei cieli volavano gli pterosauri, oramai in parte sostituiti da un gruppo di «teropodi piumati»: appunto, gli uccelli. I mammiferi costituivano una componente relativamente minore e «nascosta» della fauna, con forme simili a topi e delle dimensioni medie di un ratto.

Valeva anche per la fauna cretacea, e per i dinosauri in particolare, la regola della peculiarità insulare?

Dinosauri continentali

Per quantificare il numero di specie in comune con il continente più vicino in una data isola del Cretaceo, nonché per stabilire quante specie fossero endemiche e se la diversità faunistica fosse elevata o meno, dovremmo avere un numero sufficiente di dati per quanto riguarda sia l'isola sia il continente in uno stesso momento geologico. Non è questo il caso, perché i resti fossili forniscono spesso solo una visione incompleta delle faune presenti. E, soprattutto, non abbiamo testimonianze cronologicamente corrispondenti tra isole e continenti vicini. Inoltre, conosciamo solo indicativamente quali potessero essere le dimensioni e le posizioni reciproche delle isole. Ciò che possiamo fare è comparare le associazioni continentali note attraverso i fossili e quelle che per motivi geologici si presume fossero insulari, confrontando dimensioni degli individui, variabilità intraspecifica (se le dimensioni del campione lo consentono), presenza o assenza di caratteri primitivi, di endemismi e di grandi predatori.

Afroarabia, Sud America, Asia centrale e Nord America erano zone emerse che si estendevano per milioni di chilometri quadrati, nelle quali abbiamo abbondanti testimonianze della presenza di dinosauri del Cretaceo. Facciamo alcuni esempi, per avere un'idea delle dimensioni raggiunte sui continenti da questi animali. In Africa settentrionale, 95 milioni di anni fa, viveva il sauropode *Paralititan*, che si stima raggiungesse quasi 60 tonnellate di peso. Predatori contemporanei erano i teropodi *Carcharodontosaurus* e *Spinosaurus*, che potevano superare i 12 metri di lunghezza. Più o meno contemporaneamente, in Sud America (Argentina) esistevano sauropodi altrettanto grandi, se non di dimensioni ancora maggiori, come *Argentinosaurus*, e predatori di oltre 12 metri di lunghezza come *Giganotosaurus*. In Asia, alla fine del Cretaceo, l'adrosauro cinese *Shantungosaurus* superava i 15 metri di lunghezza, e il teropode mongolo *Tarbosaurus* poteva raggiungere i 10 metri.

In Nord America, rocce di circa 110 milioni di anni fa hanno fornito i resti del sauropode *Sauroposeidon*, la cui lunghezza è stimata in 25 metri e il peso in 55 tonnellate, e del predatore *Acrocanthosaurus*, lungo 11,5 metri. Le classiche faune campaniane (72-78 milioni di anni fa) sono dominate da adrosauridi lunghi 8-12 metri e pesanti 2-6 tonnellate e da massicci ceratopsidi. I maggiori teropodi erano lunghi fino a 8,5-9 metri (*Albertosaurus* e *Daspletosaurus*). Le faune della fine del Maastrichtiano (65 milioni di anni fa) presentano predatori ancora più grandi – come *Tyrannosaurus rex*, che superava i 12 metri di lunghezza e le 6 tonnellate di peso – e grandi vegetariani come l'adrosauro *Edmontosaurus* che poteva raggiungere i 12 metri di lunghezza e le 3-4 tonnellate di peso, il ceratopside *Triceratops* (fino a 8 metri per 5 tonnellate), e l'anchilosauro *Ankylosaurus*, che secondo alcune stime raggiungeva i 10 metri di lunghezza.

LA DISTRIBUZIONE DELLE LUNGHEZZE delle orme delle zampe posteriori di sauropodi in un sito albiano dell'Istria (Isola adriatica) e in quelli del Texas. In ordinata è indicato il numero delle orme ritrovate, in ascissa la lunghezza, in centimetri. Nel complesso, le dimensioni lineari delle orme dei sauropodi istriani (*in rosso*) sono la metà di quelle del Texas. Sotto, un confronto tra la dimensione media delle orme della zampa posteriore di teropode nell'Albiano e Cenomaniano dell'Istria (*a sinistra*), basata su di un campione di oltre 350 esemplari, e quella dei teropodi, grossomodo coevi, nordamericani (*a destra*). Le dimensioni dei teropodi istriani erano sensibilmente minori.

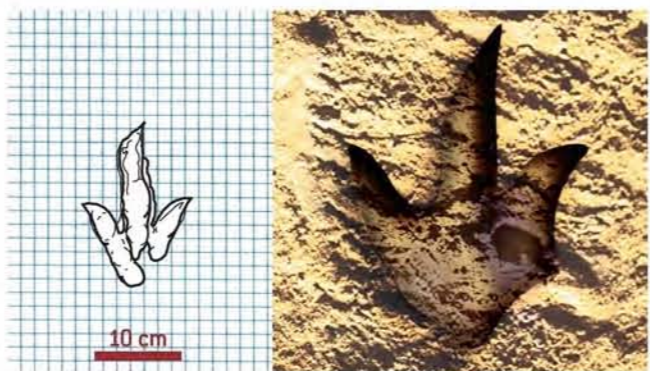
Danilo Sossi

Dinosauri dell'Arcipelago europeo: l'Isola austro-transilvana

Non tutte le isole dell'Arcipelago europeo hanno fornito resti sufficienti per un confronto con le faune continentali. Consideriamo le associazioni principali, iniziando dalla Transilvania. L'insularità della fauna – ipotizzata da Nopcsa – e le ridotte dimensioni dell'isola sono stati ribaditi nel 1991 da David B. Weishampel, della Johns Hopkins University a Baltimora, Dan Grigorescu, dell'Università di Bucarest, e David B. Norman, dell'Università di Cambridge. Essi hanno stimato l'estensione dell'isola – da loro chiamata Isola Hateg, dal nome di un villaggio transilvana vicina ai siti fossiliferi – in 7500 chilometri quadrati, una superficie minore di quella dell'attuale Creta. Secondo la mappa paleogeografica elaborata nel 2000 da Jean Philip e Marc Floquet dell'Università di Provenza e del CNRS, quella zona della Transilvania si trovava probabilmente ai margini di un'isola più grande, ma comunque minuscola rispetto al continente afroarabico, che chiamerò Isola austro-transilvana. I dinosauri transilvani sono sempre stati considerati tra gli ultimi a essere vissuti sul pianeta, ma recentemente la loro datazione è stata messa in dubbio, e potrebbe in realtà variare tra i 72 e i 65 milioni di anni fa.

I resti di dinosauro più frequenti appartengono al sauropode *Magyarosaurus*, le cui dimensioni sono sorprendentemente ridotte: si tratta degli esemplari di sauropodi adulti più piccoli in assoluto. Il suo omero (osso del braccio) è lungo meno di 40 centimetri, contro gli oltre 170 di *Paralititan*. Studi morfometrici suggeriscono che *Magyarosaurus* fosse un «nano pedomorfico», cioè una forma che ha smesso di crescere ed è diventata adulta quando la crescita non era ancora completata. Infatti, gli adulti di *Magyarosaurus* conservano i caratteri dei sauropodi immaturi.

Un altro vegetariano ben rappresentato è l'adrosauro *Telmatosaurus*. La sua lunghezza massima è stata stimata in 5 metri e la massa corporea in soli 500 chilogrammi. È considerato una forma inusualmente primitiva e piccola rispetto ai suoi contemporanei «cugini» di Nord America e Asia. E relativamente comune è un altro vegetariano, un ornitopode rhabdodontide lungo fino a 3-4 metri, un tempo considerato una specie endemica del genere francese *Rhabdodon*. In realtà, sembra trattarsi di un genere separato, *Zalmoxes*, peculiare della Transilvania. Infine, rari sono i resti di *Struthiosaurus*, un anchilosauro non più lungo di tre metri, una forma piuttosto piccola e scarsa se confrontata con i contemporanei anchilosauri nordamericani.

Le testimonianze dei predatori sono molto più rare. I grandi teropodi sono rappresentati da un solo frammento di cranio, mentre i piccoli teropodi (testimoniati da singoli denti o frammenti cranici) sono relativamente più comuni e differenziati. Durante la campagna di scavo a cui ho partecipato nel 1997, nessun resto di grande teropode è venuto alla luce e il rinvenimento di due singoli denti e di una parte di cranio di piccoli teropodi è stato considerato eccezionale. Nelle collezioni del Museo di Deva, frutto di anni di ricerche, non vi sono resti di grandi teropodi. L'unica loro testimonianza appartiene a un individuo ben più piccolo dei coevi grandi carnivori nordamericani.

Danilo Sossi

I resti di un adrosauro di due metri di lunghezza rinvenuti in depositi di mare profondo della Baviera risalenti al Maastrichtiano sono, secondo l'ex conservatore del Museo di paleontologia di Monaco, Peter Wellnhofer, un esempio di nanismo insulare. Probabilmente l'animale viveva nell'Isola austro-transilvana, situata appena più a sud, e la carcassa era stata portata in mare aperto dalle correnti marine. La piccola fauna di Muthmannsdorf (in Austria) viveva sulla stessa isola, ma in tempi precedenti (81-83 milioni di anni fa). Il 95 per cento dei resti di dinosauro appartengono a un piccolo anchilosauro, *Struthiosaurus austriacus*, forse una specie diversa da quella transilvana. Più rari sono i resti di un ornitopode rhabdodontide, *Mochlodon*, affine a *Rhabdodon* e *Zalmoxes*. I dinosauri austriaci sono tassonomicamente e dimensionalmente simili a quelli della Transilvania. Due denti rappresentano un teropode di modeste dimensioni (*Megalosaurus pannoniensis*). *Doratodon*, un piccolo coccodrillo dalla dentatura peculiare, è stato rinvenuto in questo sito, in Transilvania e forse anche nell'Isola adriatica, ma non nell'Isola ibero-armoricana.

L'Isola ibero-armoricana (o ibero-occitana)

Alla fine del Cretaceo, era la più grande isola dell'arcipelago. Comprendeva gran parte dell'attuale Penisola Iberica, la Francia meridionale e sudoccidentale e il blocco sardo-corso. Nel Cenomaniano (95 milioni di anni fa), al momento di massimo innalzamento marino, era divisa in quattro parti separate tra loro da bracci di mare basso. I resti di dinosauro sono relativamente abbondanti nelle rocce del Campaniano inferiore-Maastrichtiano superiore, soprattutto in Spagna e nella Francia meridionale. In linea di massima, i dinosauri di quest'isola sono simili a quelli presenti nell'Isola austro-transilvana, ma differiscono a livello di genere o di specie. Questa caratteristica, unita a una sensibile differenza di coccodrilli e mammiferi, suggerisce un interscambio piuttosto limitato tra le due isole.

LO SCHELETRO DI UN ADROSAURO PRIMITIVO e di ridotte dimensioni, soprannominato «Antonio», rinvenuto nel sito del Villaggio del Pescatore, nel Carso, vicino a Monfalcone. Risale a circa 85-83 milioni di anni fa, e viveva sull'Isola adriatica. Gli adrosauri erano i più frequenti e grandi vegetariani terrestri della fine del Cretaceo.

Grazia Neri

I sauropodi erano comuni, con forme di dimensioni piuttosto contenute, come *Lirainosaurus*, il cui omero era lungo solo 54 centimetri, e *Ampelosaurus*, che forse raggiungeva i 13 metri di lunghezza. Come nel caso di *Magyarosaurus*, le dimensioni relativamente ridotte di *Ampelosaurus* sembrerebbero dovute a un prematuro arresto dello sviluppo. Resti di sauropodi titanosauri, sia ossa sia orme, sono frequenti nel Campaniano superiore e nel Maastrichtiano. Le loro dimensioni sono in generale più grandi di quelle dei sauropodi transilvani, ma la cosa non è sorprendente, dato che l'Isola ibero-armoricana era molto più vasta di quella austro-transilvana.

Le numerose uova rinvenute in Francia e in Spagna erano state attribuite a sauropodi del genere *Hypselosaurus*, ma non vi sono prove decisive a favore di questa attribuzione. *Hypselosaurus* è un genere di dubbia identità, nel quale in passato erano raggruppati tutti i resti frammentari di sauropode rinvenuti nel Cretaceo superiore francese. Le ossa appartengono a individui non più lunghi di 8-10 metri. I casi di sauropodi di dimensioni maggiori sono piuttosto rari tanto in Francia quanto in Spagna.

Gli adrosauri sono frequenti nelle rocce del Campaniano superiore-Maastrichtiano superiore, e sono rappresentati da forme primitive indeterminate e dal più evoluto *Pararhabdodon*. Il genere transilvano *Telmatosaurus* non sembra essere presente. Le dimensioni degli adrosauri ibero-armoricani sono quasi sempre nettamente inferiori a quelle dei loro coevi «cugini» nordamericani.

Rhabdodon, piuttosto diffuso nell'isola prima del Maastrichtiano superiore, con i suoi 4-6 metri di lunghezza rivaleggiava per dimensioni con gli adrosauri. I resti di questo dinosauro presentano peraltro una grande variabilità morfologica. I rhabdodontidi (*Rhabdodon*, *Mochlodon* e *Zalmoxes*) erano una famiglia di dinosauri piuttosto primitiva, endemica dell'Arcipelago europeo. Secondo alcuni paleontologi sono imparentati con *Tenontosaurus*, un ornitopode estinto in Nord America già prima della fine del Cretaceo inferiore. Il piccolo anchilosauro *Struthiosaurus* è presente a sua volta su quest'isola, anche se probabilmente con una specie diversa da quelle austro-transilvane.

I predatori sono più rari e frammentari dei vegetariani, con forme di dimensioni per lo più ridotte. Si tratta soprattutto di dromeosauridi come *Pyrosaurus* e *Variraptor*. *Tarascosaurus* – del Campaniano francese – è rappresentato da un femore piuttosto gracile. Altri rari resti sparsi del Campaniano e del Maastrichtiano testimoniano la presenza di carnivori più grandi, ma nessuno era realmente gigantesco come *Tyrannosaurus* o *Carcharodontosaurus*.

Anche i coccodrilli, le tartarughe e i mammiferi dell'Isola ibero-armoricana mostrano un endemismo piuttosto marcato, in accordo con una loro segregazione insulare.

Gli adrosauri maastrichtiani del Limburgo presentano dimensioni relativamente ridotte, dato che un femore è lungo 50 centimetri, meno della metà della lunghezza media dei femori degli adrosauri nordamericani. E anche i rari resti di predatori appartengono a forme di piccola taglia. Queste ossa sono conservate in depositi di mare aperto, e quindi appartenevano a carcasse flottanti, forse provenienti dall'Isola ibero-armoricana o da quella renano-boema.

L'Isola adriatica

La zona più meridionale dell'arcipelago, verso la costa afroarabica, era occupata da piattaforme carbonatiche. In sintesi, si tratta di piatte zone di mare basso (0-50 metri) che cingono un'area continentale o circondano un'isola oceanica, nelle quali si ha prevalente deposizione di sedimenti carbonatici. Queste piattaforme si formano per lo più nella fascia tropicale: un classico esempio attuale è il Great Bahama Bank. Una grande piattaforma carbonatica si trovava nel mezzo della Tetide, e i suoi resti affiorano ora dall'Italia (Friuli) alla Bulgaria attraverso l'Istria e la Dalmazia. Essa era rimasta isolata a causa dell'apertura di un bacino oceanico che l'aveva separata, circa 120 milioni di anni fa, dal margine continentale afroarabico. Alla fine del Cretaceo era migrata a nord, avvicinandosi all'Isola austro-transilvana. Nelle mappe paleogeografiche questa piattaforma è di solito riportata come una zona di mare basso priva di isole. Il rinvenimento di fossili di dinosauri e piante, soprattutto nella sua parte settentrionale, è una chiara prova dell'esistenza di zone emerse, che chiamerò qui «Isola adriatica». Non abbiamo un'idea delle sue dimensioni. Se ci basiamo sulle mappe paleogeografiche, la massima estensione della piattaforma, raggiunta 95 milioni di anni fa, era di circa 325.000 chilometri quadrati: era dunque più grande della Nuova Zelanda e più piccola del Madagascar.

Orme di dinosauri sono note in Istria in livelli di 105-100 (Albiano) e 95 milioni di anni fa (Cenomaniano). Sono quindi un po' più antiche dei reperti delle altre isole. I dinosauri albiani erano rappresentati da piccoli sauropodi, piccoli teropodi e rarissimi teropodi più grandi. Un ornitopode di dimensioni modeste (l'orma della zampa posteriore è lunga 28 centimetri) è testimoniato da una singola pista. La più grande orma della zampa anteriore di sauropode è larga solo 24 centimetri, e quella della zampa posteriore è lunga circa 50, ma la media è decisamente più bassa. Si tratta di dimensioni davvero ridotte per gli standard di questi animali. Nel Cenomaniano l'associazione non cambia: piccoli sauropodi con zampe posteriori non più lunghe di 40 centimetri e orme di piccoli teropodi. Una stima approssimativa delle dimensioni dei sauropodi dell'Isola adriatica dà una lunghezza di 12 metri per il più grande sauropode albiano, 7,8 per la media dei sauropodi albiani e 9,2 per quelli cenomaniani. Anche se queste stime possono apparire grandi, in realtà il tronco di un sauropode albiano non era molto più lungo di quello di un toro e il resto era tutto collo e coda. Una stima della massa corporea della media dei sauropodi albiani è di circa 3400 chilogrammi, e 5600 per quelli cenomaniani, rispettivamente 17 e 10 volte inferiore rispetto alla supposta massa dell'afroarabico *Paralititan*.

Dopo il Cenomaniano, la fauna dell'isola sembra cambiare. Rocce di circa 85 milioni di anni fa del Carso italiano hanno fornito abbondanti resti di un piccolo adrosauro delle dimensioni di *Telmatosaurus*. Sembra probabile anche uno stretto grado di parentela con il genere transilvano, con il quale l'adrosauro del Carso condivide evidenti caratteri di primitività. Altre caratteristiche insolite – per esempio un femore decisamente corto, un lunghissimo ischio e forse solo tre dita nella zampa anteriore – sono probabilmente aberrazioni dovute al confinamento insulare. Il confronto di uno scheletro completo e articolato, recuperato nel 1999 e soprannominato «Antonio», con gli altri adrosauri dell'Arcipelago chiarirà molti aspetti dell'evoluzione di questi dinosauri. Nel sito è stato trovato anche un possibile resto di un teropode di ridotte dimensioni e piccoli coccodrilli. Non vi sono, invece, ossa di sauropode.

Poco lontano, presso Kozina, nel Carso sloveno, una fessura prodotta dal carsismo cretaceo – probabilmente maastrichtiano – ha fornito denti di adrosauro, di un altro piccolo ornitopode e di teropodi e coccodrilli di ridotte dimensioni.

L'Isola apula

Si suppone che la piattaforma carbonatica apula durante il Cretaceo superiore fosse separata dalle altre piattaforme della Tetide attraverso profondi e ampi bracci di mare. Anche in questo caso, le mappe paleogeografiche non evidenziano aree emerse, perché le testimonianze geologiche del fenomeno sono limitate. Tuttavia, i dinosauri erano presenti alla fine del Giurassico, nonché nel Cretaceo inferiore e superiore, insieme a resti di vegetazione terrestre, quindi non vi è dubbio che parte della piattaforma fosse emersa e costituisse l'Isola apula.

Migliaia di orme di dinosauro sono state scoperte in calcari del Coniaciano superiore-Santoniano inferiore nei pressi di Altamura (Bari). Tutte appartengono a quadrupedi di dimensioni decisamente piccole per lo standard dei dinosauri. Alcune di esse sono state identificate da Umberto Nicosia e collaboratori dell'Università «La Sapienza» di Roma come le tracce di un adrosauro di 5 metri di lunghezza (l'orma della zampa posteriore è lunga solo 25 centimetri). Altre potrebbero appartenere a piccoli anchilosauri o a sauropodi nani. Non vi sono impronte di predatori, poiché mancano quelle tridattili dei teropodi e nessuna sembra attribuibile a coccodrillomorfi. Nonostante quello di Altamura sia un dato puntiforme, il campione è rilevante per quantità e si accorda con quanto osservato nelle altre isole dell'Arcipelago.

Infine, resti di un adrosauro (*Orthomerus weberi*) sono stati trovati in Crimea in depositi di mare aperto della fine del Maastrichtiano. Si tratta probabilmente di una carcassa flottante, proveniente dall'Isola ucraina.

Piccoli sì, ma non troppo

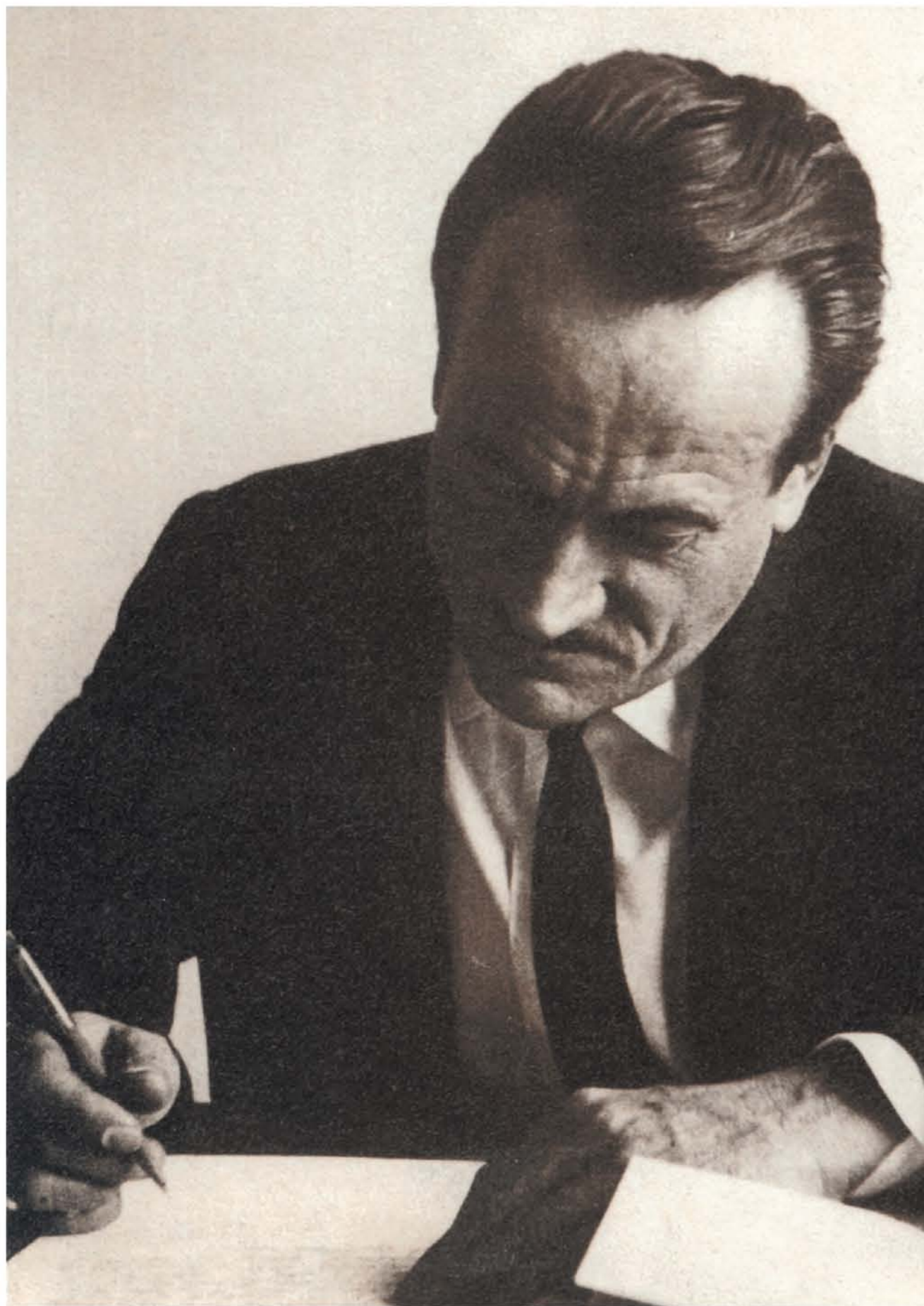
In conclusione, le faune a dinosauri dell'Arcipelago europeo hanno molte caratteristiche in comune con quelle insulari recenti. Tuttavia le dimensioni dei dinosauri insulari, pur essendo decisamente minori di quelle dei loro corrispettivi continentali, sono di gran lunga maggiori di quanto ci si aspetterebbe in animali endotermi. Le dimensioni dei sauropodi dell'Isola adriatica corrispondono a quelle di un elefante normalmente sviluppato o persino di grandi dimensioni, mentre questi ultimi nelle isole pleistoceniche si sono stabilizzati su dimensioni decisamente minori. Ciò suggerisce che le necessità alimentari dei dinosauri fossero molto più ridotte di quelle degli animali «a sangue caldo» attuali, e che il loro fosse un metabolismo più di tipo ectotermico che endotermico.

La sfida che i dinosauri insulari pongono è la ricostruzione della loro storia evolutiva. In particolare, l'identificazione del continente di provenienza e delle vie attraverso le quali sono riusciti a colonizzare l'Arcipelago europeo passando, in taluni casi, da un isola all'altra. In ultima analisi, si tratta di un piccolo contributo alla comprensione di come la vita si sia evoluta (e si stia evolvendo) su questo nostro pianeta.

BIBLIOGRAFIA

WEISHAMPEL D. B., GRIGORESCU D. e NORMAN D. B., *The Dinosaurs of Transylvania*, in «National Geographic Research & Exploration», 7, pp. 196-215, 1991.

BURNESS G. P., DIAMOND J. e FLANNERY T., *Dinosaurs, Dragons, and Dwarfs: The Evolution of Maximal Body Size*, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», 98, pp. 14518-14523, 2001.

DALLA VECCHIA F. M., *Cretaceous Dinosaurs in the Adriatic-Dinaric Carbonate Platform (Italy and Croatia): Paleoenvironmental Implications and Paleogeographical Hypotheses*, in «Memorie della Società Geologica Italiana», 57, pp. 89-100, 2002.

Tutte le immagini di questo articolo sono state cortesemente fornite dall'Archivio Buzzati-Traverso della Sezione di storia della medicina dell'Università «La Sapienza» di Roma e dalla Fondazione Buzzati-Traverso

La rivoluzione mancata della biologia italiana

di Gilberto Corbellini e Mauro Capocci

Adriano Buzzati-Traverso ha cercato per oltre trent'anni di portare a livello internazionale la ricerca biologica italiana. Un'impresa che, sia pure incompiuta, ha lasciato un segno scientifico, culturale e intellettuale

Il 22 aprile 1983 moriva a Milano Adriano Buzzati-Traverso. Aveva settant'anni, e per quasi tre decenni, a partire dai primi anni quaranta, aveva tentato di rinnovare i metodi e gli scopi della ricerca biologica e della formazione scientifica in Italia, cercando di cambiare la politica e la percezione culturale della scienza, anche per rafforzare la prospettiva laica e liberal-democratica nel paese. A vent'anni dalla morte, ricordare l'originalità, almeno per l'Italia, delle sue idee, le importanti ricadute di diverse sue iniziative, ma anche gli insuccessi di alcuni progetti di rilievo, significa farsi un quadro realistico delle (poche) sfide vinte e di quelle perdute dal nostro paese negli anni in cui la scienza occidentale diventava definitivamente il motore dello sviluppo civile ed economico del pianeta. Vuol dire, in pratica, non solo ripercorrere una biografia che ha intersecato i grandi temi e i protagonisti della biologia evoluzionistica, della genetica molecolare e della biofisica nei decenni a cavallo del 1950, ma anche un approccio ai problemi della ricerca e della formazione anomalo per l'Italia, richiamando alla memoria quello che si poteva e si doveva fare – e che in larga parte non è stato fatto – per prevenire le drammatiche condizioni in cui versa il nostro sistema della ricerca e della formazione scientifica e tecnica.

“In Italia quasi mai si riesce ad ottenere del danaro per il funzionamento di un laboratorio, per aumentare il personale o per offrire a questo un trattamento economico meno vergognoso”

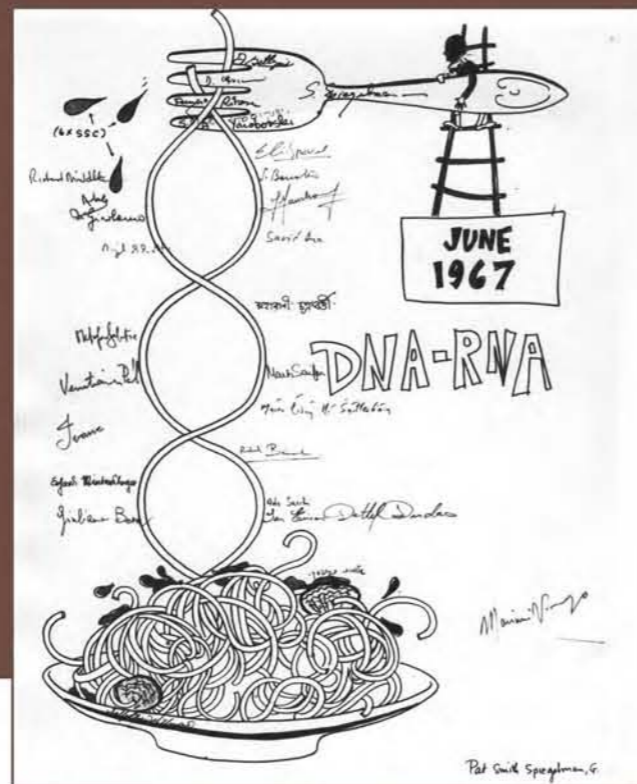
Adriano Buzzati-Traverso, 1935

Formatosi come genetista di popolazioni e biofisico negli Stati Uniti e alla scuola di Nikolai Timofeev-Ressovsky, dal 1938 Buzzati-Traverso cominciava a far conoscere in Italia i metodi della «radiogenetica» e la teoria dell'urto, vale a dire l'insieme di approcci teorici e sperimentali alla struttura del gene sviluppati negli anni trenta da Nikolai Timofeev-Ressovsky, K. G. Zimmer e Max Delbrück, basato sull'analisi del volume d'urto delle radiazioni a livello delle strutture subcellulari.

A Pavia, dove diventava professore di genetica nel 1948, intraprese un approccio sperimentale all'evoluzione studiando, anche in collaborazione con Luigi Luca Cavalli-Sforza e Niccolò Visconti di Modrone, le mutazioni indotte in popolazioni di *Drosophila* e di microrganismi attraverso radiazioni e agenti per valutare i vantaggi selettivi dei mutanti. Nel 1948 assumeva anche la direzione del Centro per lo studio della biofisica del Consiglio nazionale delle ricerche, creato presso l'Istituto italiano di idrobiologia «Dottor Marco De Marchi» di Pallanza.

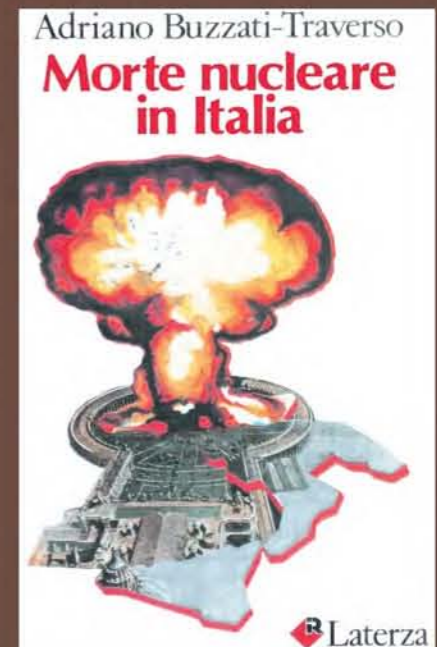
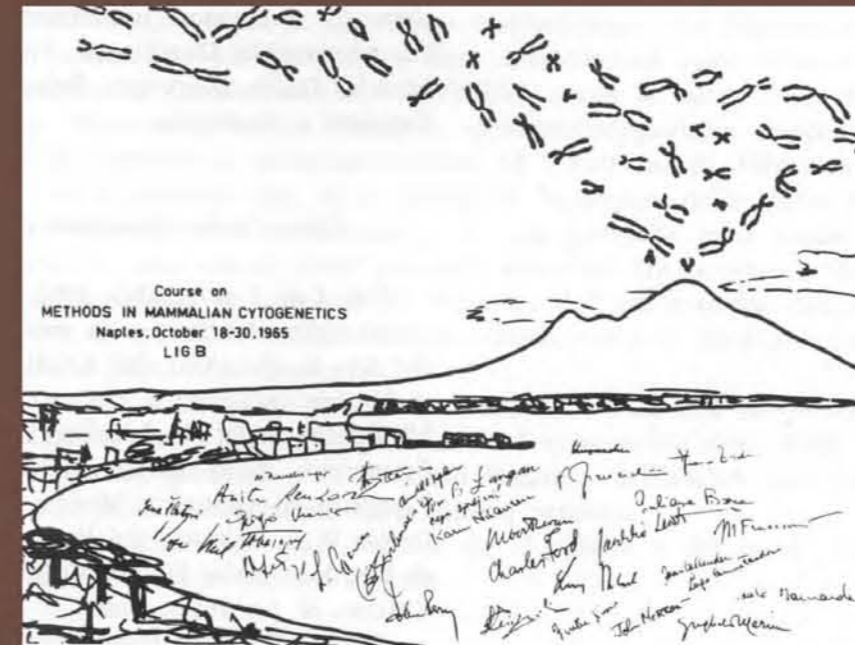
L'approccio di Buzzati-Traverso ai problemi della genetica e della biologia evoluzionistica rappresentava indubbiamente una novità rispetto alla tradizione degli studi biologici in Italia. Egli introdusse un'attenzione del tutto nuova per i problemi teorici della genetica e della biologia evoluzionista, affrontate attraverso una metodologia sperimentale e biofisica che mirava a definire la natura e la struttura del gene e il ruolo delle mutazioni. Il suo programma di ricerca era studiare le mutazioni indotte dalle radiazioni, per ottenere informazioni circa l'organizzazione del materiale genetico e il funzionamento dei meccanismi evolutivi.

L'evoluzione di un impegno civile

A partire dal 1935 Buzzati-Traverso aveva cominciato a visitare i principali laboratori di genetica, biofisica e zoologia, facendosi un'idea ben precisa di che cosa rendeva così efficienti i sistemi della ricerca nel mondo anglosassone, così come in Francia, e di quali erano i fattori che frenavano il decollo della ricerca e della formazione scientifica in Italia. Nel 1950 pubblicava, sulla rivista del CNR, «La Ricerca Scientifica», un articolo in cui contrapponeva l'austerità degli istituti di ricerca anglosassoni, che privilegiano gli investimenti in risorse umane e librarie, alla sontuosità dei laboratori e degli uffici dei professori universitari italiani.

Si trattava della prima, lucida denuncia da parte di un professore universitario italiano – coraggiosa, considerato che non era ancora stato confermato ordinario – dell'inefficienza di un sistema che sperperava «pubblico danaro per fare degli edifici imponenti, lustri, di bella apparenza (almeno per qualche anno); che poi essi rispondano alle esigenze del buon funzionamento di un laboratorio sembra una questione secondaria». In Italia – ribadiva – si trovano finanziamenti pubblici o privati per tirar su muri e magari comprare anche apparecchi costosi, ma «quasi mai si riesce ad ottenere del danaro per il funzionamento di un laboratorio, per aumentare il personale o per offrire a questo un trattamento economico meno vergognoso». E chiosava: «Stipendi ridicoli, impossibilità pratica di licenziamento per scarso rendimento, numero di posti insufficiente e fissato da tabelle organiche costanti attraverso le ere geologiche, impossibilità di determinare una concorrenza basata su diversi livelli di stipendio corrispondentemente alle capacità ed al rendimento, estrema difficoltà di ottenere sia da enti pubblici sia da enti privati danaro per stipendi a laureati e tecnici, con sufficiente garanzia di continuità».

Erano questi, per Buzzati-Traverso, i problemi con cui avrebbe dovuto confrontarsi qualsiasi tentativo di dare un futuro alla ricerca in Italia. In quel momento, egli era ancora fiducioso nel ruolo che poteva svolgere il Consiglio nazionale delle ricerche.

Dal 1956 fino alla fine degli anni sessanta, Buzzati-Traverso sottopose a serrata critica il sistema della ricerca e della formazione scientifica dalle pagine di diversi giornali: «Il Giorno» (fondato da Enrico Mattei), «L'Espresso», il «Corriere della Sera», «Sapere». I suoi articoli, spesso denunce documentate del malfunzionamento del sistema italiano e dell'oblio politico nei riguardi della scienza e della cultura scientifica, rimangono un esempio straordinario di una pubblicistica scientifica concepita come impegno civile e di fatto scomparsa dai quotidiani e dai rotocalchi.

Raccolti nel 1969 in un libro emblematicamente intitolato *Il fossile denutrito: l'Università italiana*, se li si rilegge oggi inducono a un senso di profondo sconforto. Sono cambiati i numeri, i parametri di confronto internazionale, alcuni aspetti delle regole di distribuzione dei finanziamenti o del reclutamento di docenti e ricercatori: ma le deformazioni culturali e i perversi meccanismi denunciati da Buzzati-Traverso, che zavorrano questo paese e lo stanno condannando al declino economico e civile, continuano a pervadere il sistema.

ADRIANO BUZZATI-TRAVERSO RITRATTO NEGLI ANNI QUARANTA, con l'immancabile pipa. In alto, le cartoline ricordo di due corsi tenutisi al Laboratorio di genetica e biofisica di Napoli: «Ibridazione DNA-RNA» (del 1967) e «Citogenetica dei mammiferi» (del 1965). A destra, *Morte nucleare in Italia* è stato l'ultimo libro pubblicato da Adriano Buzzati-Traverso, nel 1982.

Non è questa la sede per parlarne, ma l'impegno civile di Buzzati-Traverso ha spesso riguardato anche la valorizzazione dei diritti individuali in un'ottica libertaria, cosa che lo ha spesso portato a criticare le scelte repressive del mondo cattolico italiano in merito a temi come il controllo delle nascite e l'aborto.

Il problema della formazione

Che cosa si sarebbe dovuto fare per migliorare il sistema, Buzzati-Traverso non lo ha semplicemente esposto per iscritto. Lo ha mostrato con iniziative concrete.

Tornato in Italia nel 1956, dopo aver trascorso tre anni negli Stati Uniti come professore all'Università della California e direttore della divisione di genetica della Scripps Institution of Oceanography di La Jolla, gli parve che stessero maturando nuove condizioni politiche ed economiche, soprattutto in virtù di un contesto internazionale che ormai, almeno in Occidente, riconosceva alla scienza e alla tecnologia un ruolo centrale per lo sviluppo economico e culturale. In particolare, gli investimenti militari e industriali nella ricerca nucleare di base e applicata creavano nuove opportunità per gli studi di biofisica e genetica molecolare in rapporto al problema degli effetti biologici e quindi delle conseguenze medico-sanitarie delle radiazioni.

Nell'ottobre 1957, il CNRN (Comitato nazionale per le ricerche nucleari, fondato nel 1952 come branca del CNR) aveva affidato a Buzzati-Traverso la direzione scientifica della neonata «Divisione Biologica», per fornire servizi di prevenzione e protezione riguardo alla contaminazione radioattiva, ma anche per promuovere e finanziare ricerche sugli effetti delle radiazioni ionizzanti sugli organismi. Nel 1960 il CNRN si staccò dal CNR, diventando autonomo: il Comitato nazionale per l'energia nucleare (CNEN). Al suo interno continuava a operare una «Divisione Biologica e di Protezione Sanitaria» sotto la direzione di Buzzati-Traverso. Agli obiettivi originari si aggiunse quello di istituire collaborazioni con organizzazioni simili e con ricercatori di altre nazioni.

Di fatto, in quegli anni Buzzati-Traverso aveva già maturato l'idea di creare un ente sganciato dall'Università, con legami in-

IL «CAMPO GAMMA» DEL LABORATORIO ENEA DELLA CASACCIA, dove vennero sottoposte a irradiazione alcune varietà vegetali allo scopo di migliorarne il rendimento. In basso, l'«albero» di Buzzati-Traverso, in cui sono raffigurate tutte le principali attività svolte durante la sua carriera e le discipline a cui si dedicò.

"...ho avuto modo di interessare ai miei studi, e addestrare, dei giovani... È la soddisfazione maggiore che un uomo della mia età può ottenere."

Adriano Buzzati-Traverso, inaugurazione della Fondazione Anna Villa e Felice Rusconi, 1975

GLI AUTORI

GILBERTO CORBELLINI è professore di storia della medicina presso l'Università «La Sapienza» di Roma. MAURO CAPOCCI ha conseguito il dottorato in storia della scienza all'Università di Firenze, e attualmente svolge attività di ricerca presso la Sezione di storia della medicina dell'Università «La Sapienza» di Roma.

BIBLIOGRAFIA

CAPOCCI M. e CORBELLINI G., *Adriano Buzzati Traverso's vision of molecular biology in Italy. The origins and decline of the International Laboratory of Genetics and Biophysics*, in «Studies in the History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences», 33; pp. 489-513, 2002.

La bibliografia di Adriano Buzzati-Traverso, insieme a un'ampia e articolata contestualizzazione storica della sua esperienza si può consultare al seguente indirizzo: http://www.iigb.na.cnr.it/abt/index.htm

ternazionali in grado di promuovere la ricerca, ma soprattutto la formazione, in biologia molecolare. L'ambiente scientifico non era però dei più favorevoli, dato che – al di là di poche, meritorie eccezioni – mancava una comunità di ricerca caratterizzata dall'approccio molecolare e biofisico alle scienze della vita.

Uno dei problemi con cui dovette confrontarsi fu la mancanza di ricercatori adeguatamente preparati. Per rispondere a tale carenza, diede vita nel settembre 1957 a un «Corso di perfezionamento sulla azione biologica delle radiazioni e sul suo sfruttamento ai fini agricoli e industriali» promosso dall'Istituto di genetica di Pavia e dal CNRN. Modellata sui programmi anglosassoni di Ph.D., l'organizzazione fu talmente inusuale per l'Italia del tempo che ancor oggi se ne parla negli ambienti della genetica italiana in termini quasi leggendari. Il fatto che più è rimasto impresso nella memoria dei corsisti erano le borse di studio da 80.000 lire mensili, anticipate. Il programma aveva durata biennale, ed era aperto a 15 corsisti selezionati attraverso un bando pubblico sulla base del curriculum accademico e della conoscenza dell'inglese scritto. Suddiviso in quattro semestri, includeva lezioni teoriche ed esercitazioni. Inoltre i corsisti avevano a disposizione dei tutor. Fra i docenti figuravano nomi di primo piano della biologia contemporanea: Seymour Benzer, Ronald Fisher, Theodosius Dobzhansky, Joshua Lederberg e Salvatore Luria.

I corsi del 1957/58 e del 1959/60 formarono molti ricercatori che sarebbero poi entrati nell'organico del Laboratorio di genetica e biofisica di Napoli, o che sarebbero diventati docenti universitari di genetica.

Idee folli

Parallelamente al lavoro politico-diplomatico che lo porterà a creare il Laboratorio internazionale di genetica e biofisica come risultato di una collaborazione internazionale tra istituzioni pubbliche, Buzzati-Traverso lavorava a un'idea che egli stesso definiva «folle», e che mirava a far nascere un istituto privato di formazione tecnologica a livello universitario.

L'idea era maturata leggendo la bozza di un rapporto dell'American Advisory Group on NATO Scientific and Technical Personnel, che suggeriva ai paesi occidentali – per favorire le sinergie tra pubblico e privato, e per meglio rispondere alle diverse istanze della formazione tecnico-scientifica – di promuovere una politica educativa ispirata ai modelli del Caltech e del MIT. Nell'ottobre 1957 Buzzati-Traverso si faceva inviare da Renato Dulbecco il catalogo del Caltech, e nel marzo 1958 inviava a Guido Zerilli, presidente, amministratore delegato e direttore generale della Lepetit, una bozza di progetto. Zerilli discusse l'idea anche con Luigi Einaudi, che incoraggiò l'iniziativa, e fino al 1967 il progetto sarà più volte riformulato e discusso. Ogni tentativo si arenò, però, contro le incertezze e le miopie del mondo imprenditoriale: l'investimento sarebbe stato remunerativo?

Uno dei tentativi coinvolse Enrico Cuccia, ed è utile conoscerlo per capire i limiti nella percezione del ruolo sociale ed economico della formazione scientifica che caratterizzarono in quegli anni non solo il mondo politico. Fu lo stesso Cuccia a rivolgersi a Edoardo Amaldi e Buzzati-Traverso su suggerimento di Alexander Hollaender, direttore della Divisione di biologia dell'Oak Ridge National Laboratory. Hollaender, che con Buzzati-Traverso fu un personaggio chiave per l'internazionalizzazione degli studi di radiogenetica e sugli effetti biologici delle radiazioni, invitava Cuccia a convincere gli imprenditori italiani della necessità di creare un laboratorio per la ricerca di base, finanziato in modo indipendente. Dopo un paio di incontri e la stesura di un memorandum, si approdò a un nulla di fatto: il presidente di Mediobanca non riteneva che le proposte di Buzzati-Traverso e Hollaender potessero cambiare gran che. Fu inutile anche il richiamo di Hollaender all'impatto della Rockefeller Foundation sugli sviluppi della scienza negli Stati Uniti e in Europa.

L'EURATOM ACCOLSE L'INVITO DEL CNR e del CNEN di partecipare alla creazione del Laboratorio di genetica e biofisica, il LIGB di Napoli, firmando un contratto di associazione della durata di cinque anni (a partire dal primo luglio 1962) che prevedeva il finanziamento di 620 milioni. Il CNEN stanziò subito 180 milioni annui per cinque anni. La firma dell'accordo tra CNR e CNEN, il 28 dicembre 1961, dava vita al LIGB. Con decreto del presidente del CNR datato 15 gennaio 1961 veniva istituito, con effetto dal 1° luglio 1961, il «Laboratorio internazionale di genetica e biofisica». Il 1° marzo 1962 il Laboratorio veniva ufficialmente inaugurato.

L'avventura del LIGB

Il nome di Buzzati-Traverso è indissolubilmente legato alla creazione a Napoli del Laboratorio internazionale di genetica e biofisica (LIGB), diventato nel 1968 Istituto internazionale di genetica e biofisica, e che dal 2001 porta il suo nome. Il LIGB nasceva nella primavera del 1962, con finanziamenti del CNR, del CNEN e dell'Euratom, anche grazie alla credibilità di cui godeva Buzzati-Traverso. Il Laboratorio si distingueva per l'autonomia della gestione finanziaria, che consentiva di pagare stipendi più alti rispetto all'accademia e agli altri centri del CNR, e facilitava la circolazione di personale scientifico. Tale autonomia era un inconcepibile attentato all'asfissiante, inefficiente e corrotto potere burocratico che dominava, e ancora domina, l'amministrazione della ricerca in Italia. Anche la politica poneva ostacoli, come dimostrano i processi subiti tra il 1963 e il 1964 dal presidente del CNEN, Felice Ippolito, e dall'ex direttore dell'Istituto superiore di Sanità, Domenico Marotta.

L'innovativa organizzazione del LIGB fu presa a modello anche per il Laboratorio europeo di biologia molecolare (EMBL), fondato a Heidelberg nel 1974 e inaugurato nel 1978. Quando i fisici Weisskopf e Szilard iniziarono a parlare nel 1962 di una struttura analoga al CERN per la biologia, il primo interlocutore fu Buzzati-Traverso, che propose il LIGB come sede del centro europeo, temendone l'eventuale concorrenza. Ma il progetto non andò a buon fine, sia per la crisi che colpì il laboratorio nel 1964, come riverbero dei processi a Ippolito e Marotta, sia perché Buzzati-Traverso pensava di mettere a disposizione spazi e attività, ma non di rinunciare alla guida. E altri ambivano a dirigere la ricerca europea in biologia molecolare, come il premio Nobel inglese John Kendrew, che fu il primo direttore dell'EMBL.

Quando, nel 1967, finì il contratto con l'Euratom, Buzzati-Traverso aveva già progettato un corso post-laurea in biologia molecolare, l'International Studium on Molecular Biology, finanziato dalla National Science Foundation, dalla University of California a Berkeley e dal CNR. Il nome «Studium» intendeva richiamare le organizzazioni di studenti e docenti che diedero vita nel Medioevo alle prime Università europee. Buzzati-Traverso sperava infatti di ottenere il riconoscimento internazionale del titolo attraverso le Nazioni Unite. Il progetto, per il quale era già riuscito a ottenere un milione di dollari, naufragò con la crisi seguita all'occupazione politica dell'IIGB nella primavera del 1969, pretestuosamente utilizzata per farlo dimettere dalla direzione.

Profondamente deluso, nel 1969 assunse l'incarico di Assistant Director-General for Science dell'Unesco e si dedicò a un imponente studio sullo stato della scienza nel mondo, pubblicato nel 1976 con il titolo *La sfida della scienza*. I suoi ultimi anni saranno dedicati alla possibilità di esaminare scientificamente le perturbazioni ambientali prodotte dall'attività umana a livello planetario come Senior Scientific Advisor per lo United Nations Enviromental Programme (UNEP) e di analizzare i possibili effetti di una guerra nucleare, allo scopo di contribuire al disarmo.

La rinuncia da parte di Buzzati-Traverso a proseguire nel suo sforzo di innovare e internazionalizzare la visione italiana della ricerca e della formazione in biologia molecolare ha ripristinato una prospettiva abbastanza provinciale e priva di tensioni culturali in un settore destinato a diventare *big science* e a soppiantare la fisica come frontiera della ricerca e dell'innovazione. Se la ricerca biomolecolare e l'innovazione biotecnologica hanno stentato a decollare in Italia, e se i governi e i politici si sono potuti permettere di ignorarne il ruolo per la crescita di una società moderna, è anche perché sono mancate figure di scienziati con una generosità intellettuale e una visione culturale di ampio respiro come quelle di Adriano Buzzati-Traverso.